

ÉVALUATION DU POTENTIEL DES SARGASSES COMME SOURCE DE BIOMASSE POUR LA  
PRODUCTION DE BIOGAZ AU QUINTANA ROO, MEXIQUE

Par  
Robin Sallio

Essai de double diplôme présenté au  
Centre universitaire de formation en environnement et développement durable et au  
Département de biologie de la Faculté des sciences en vue de l'obtention des grades de maître  
en environnement (M. Env.) et de maître en sciences (M. Sc.)

Sous la direction de Madame Émilie Lefol  
et de Monsieur Marc Olivier

MAÎTRISE EN ENVIRONNEMENT  
Cheminement de type cours en gestion de l'environnement

MAÎTRISE DE PROFESSIONNALISATION  
EN ÉCOLOGIE APPLIQUÉE

UNIVERSITÉ DE SHERBROOKE

Sherbrooke, Québec, Canada, septembre 2020

## SOMMAIRE

Le climat chaud, les plages de sable et les eaux azurées ont fait la renommée du Quintana Roo (Mexique) et attirent chaque année près de 13 millions de visiteurs. Ceci permet au tourisme d'être le moteur économique, avec 16,5 % du PIB, et la première source de travail de l'état en concentrant 20 % des emplois. Le développement mené depuis les années 60 avec le Plan national pour le Tourisme a offert un réel essor de l'économie et une croissance de la population phénoménale passant de 27 000 habitants en 1960 à 1,5 million en 2015. La recrudescence de ce secteur a cependant eu des impacts négatifs, particulièrement sur les écosystèmes côtiers. En effet, afin de rapprocher les visiteurs des plages de sable fin, les complexes hôteliers et les villes se sont installés sur le littoral et les dunes du nord-est du Quintana Roo. Ces structures ont contribué à la diminution la qualité des eaux côtières en accroissant la concentration de l'azote et constituent la principale cause anthropique de l'accentuation de l'érosion des rivages. Ils seraient aussi à l'origine des changements dans les systèmes récifaux proches des centres touristiques.

Depuis 2014, des flux considérables et intermittents de sargasses s'échouent sur les plages du Quintana Roo. Les deux espèces en question, *Sargassum natans* et *Sargassum fluitans*, sont dirigées par les courants de la seconde mer des sargasses au nord-est du Brésil vers les Caraïbes. Elles s'échouent alors de mai à octobre sur le rivage avec des conséquences sanitaires, socioéconomiques, mais également écologiques importantes. La putréfaction de ces algues sur le littoral perturbe les activités de baignade et libère dans l'eau et dans l'air des composés comme le sulfure d'hydrogène dangereux pour les humains et les écosystèmes exposés. Cette pression vient ainsi s'ajouter à celles déjà existantes sur des milieux fragilisés. Afin de limiter ces effets, les sargasses sont ramassées et déplacées pour qu'elles se décomposent ailleurs. Malgré leurs nombreuses utilisations potentielles dans des domaines variés, elles ne sont que très rarement exploitées.

Parmi les différentes voies de valorisation, la méthanisation représente une stratégie intéressante offrant du biogaz ou de l'électricité à partir des algues récoltées. Les rendements de ce processus en 4 étapes sont en bien dessous des potentiels théoriques (< 50 %) comme pour l'ensemble des macroalgues. La raison principale est la présence de certains composés difficilement dégradables

par les microorganismes. Les prétraitements constituent une étape préliminaire permettant d'augmenter les rendements en biogaz, mais des recherches sont encore nécessaires pour déterminer les conditions optimales de digestion. L'utilisation de plusieurs substrats, la codigestion, résoudrait aussi la problématique de dégradabilité en fournissant un substrat supplémentaire plus facilement dégradable. Dans le cadre du Quintana Roo, l'utilisation des matières résiduelles organiques semble être une option profitable. Ces matières résiduelles représentent un substrat approprié généré à proximité des lieux d'échouages massifs. Après les faibles rendements, le second obstacle à cette valorisation est l'intermittence et la variabilité des affluences. Celui-ci peut être contourné par une bonne gestion des flux, avec une récolte et un stockage adapté. Dans une optique de rendement et de préservation des écosystèmes, le ramassage en mer grâce à des barrages et de barges de collecte est la meilleure stratégie. Elle doit être mise en place où les conditions marines sont favorables puisqu'elle prévient les dommages au littoral et permet la récolte d'algues fraîches. Dans le cas de l'impossibilité d'implanter cette méthode, un ramassage sur le rivage à l'aide d'une machinerie spécialisée est requis, si la plage est dépourvue de nids de tortues. Dans le cas contraire, c'est un ramassage manuel qui doit être mis en place. Les sargasses ainsi récoltées peuvent ensuite être ensilées pour leur conservation. Elles pourront ensuite être utilisées toute l'année pour produire du biogaz ou de l'électricité.

Mots clés : sargasses, écosystèmes côtiers, méthanisation, biogaz, énergie, récolte, stockage, flux, Quintana Roo, Mexique.

## REMERCIEMENTS

En tout premier lieu, je souhaite remercier ma directrice, Émilie Lefol, et mon directeur, Marc Olivier, pour leur soutien et leurs commentaires constructifs du plan de travail jusqu'à la dernière version de cet essai. Ils m'ont suivi tout au long du processus et m'ont incontestablement aidé à bonifier cette production de fin d'études. Ils m'ont aidé et dirigé tout en me laissant agir selon mon bon vouloir et pour cela je leur suis très reconnaissant.

Je souhaite aussi montrer ma gratitude à Nina Cudennec qui m'a fourni bon nombre de documents de l'ADEME concernant les méthodes de collecte de sargasses. Ces documents m'ont grandement aidé dans la rédaction du dernier chapitre ainsi que dans l'élaboration des recommandations.

Je souhaite aussi remercier mes amis et collègues de la maîtrise qui m'ont accompagné durant les trois dernières années et qui ont rendu cette expérience à l'étranger incroyable. Ils m'ont permis de grandir intellectuellement et humainement au travers des conversations et expériences vécues ensemble. Expériences qui m'ont appris beaucoup de choses. Par exemple, il ne faut jamais s'écarter des sentiers de randonnée, à la tombée de la nuit par un froid glacial pour rejoindre au plus vite ma voiture. Enfin, je tiens à remercier mes parents qui ont relu ce travail dans ces dernières versions et qui ont financé mes études à l'étranger.

## Table des matières

INTRODUCTION .....	1
CHAPITRE 1 - LE QUINTANA ROO DANS LA PÉNINSULE DU YUCATAN .....	4
1.1. Contexte socioéconomique .....	5
1.2. Contexte écologique.....	6
CHAPITRE 2 - LA CRISE DES SARGASSES .....	11
2.1. Origine géographique et causes des affluences de sargasses.....	13
2.2. Aperçu des échouages massifs dans les Caraïbes et sur les côtes du Quintana Roo depuis 2011 .....	16
2.3. Les impacts des affluences massives de sargasses.....	20
2.3.1. Impacts sanitaires et socioéconomiques .....	20
2.3.2. Impacts écologiques.....	23
2.4. Les utilisations potentielles .....	26
CHAPITRE 3 - LA VALORISATION PAR LA MÉTHANISATION .....	30
3.1. Paramètres influençant la digestion.....	30
3.2. Les prétraitements.....	32
3.3. Processus de méthanisation .....	34
3.4. Produits de la méthanisation.....	36
3.5. Bénéfices de la méthanisation pour les écosystèmes .....	38
3.6. Résultats obtenus avec différentes macroalgues.....	39
3.7. Obstacles liés à l'utilisation des sargasses comme source de biomasse .....	45
CHAPITRE 4 - GESTION DES FLUX .....	47
4.1. Flux de sargasses entrant .....	47
4.2. Méthodes de ramassage et leurs impacts.....	52
4.2.1. La collecte en rive.....	52
4.2.2. Le ramassage en mer .....	63
4.3. Méthodes de stockage et de préservation.....	71

4.3.1. L'assèchement.....	71
4.3.2. L'ensilage.....	72
4.4. Cosubstrats disponibles.....	74
4.4.1. Les déchets municipaux .....	75
4.4.2. Les boues d'épuration.....	75
4.4.3. Les déchets agricoles.....	76
4.5. Recommandations.....	77
CONCLUSION .....	82
LISTE DES REFERENCES.....	84
ANNEXE 1 : TABLEAU COMPARATIF DES DIFFERENTES METHODES DE COLLECTE DES SARGASSES	98

## Liste des sigles, des symboles et des acronymes

ADEME	Agence de l'Environnement et de la Maîtrise de l'Énergie
CH <sub>4</sub>	Méthane
CO <sub>2</sub>	Dioxyde de carbone
DAM	Drague Aspiratrice en Marche
FAI	Floating Algae Indice (Indice des algues flottantes)
INEGI	Instituto Nacional de Estadística y Geografía (Institut national de la statistique et de la géographie)
MERIS	MEdium Resolution Imaging Spectrometer
MS	Matière Sèche
NH <sub>3</sub>	Ammoniac
PIB	Produit Intérieur Brut
ppm	Partie Par Million
SEMAR	Secretaría de Marina (Secrétariat de la Marine)
SEMARNAT	SEcretaría de Medio Ambiente y Recursos NATurales (Secrétariat de l'environnement et des ressources naturelles)

## Lexique

Affouillement	Action de creusement des eaux, due à la butée des courants sur une rive, aux remous sur les jetées, etc.
Cénotes	Terme spécifique au Mexique pour désigner des grottes et cavités remplies d'eau.
Codigestion	Digestion de plusieurs substrats.
Culture énergétique	Espèce végétale cultivée pour produire de la biomasse destinée à une valorisation énergétique.
Effluent	Fraction liquide rejetée à la suite d'un traitement ayant débarrassée la matière de tout produit de valeur.
Inoculum	Échantillon contenant des microorganismes vivants.
Municipalité	Au Mexique, les municipalités ( <i>municipios</i> ) constituent le second échelon de la division territorial après les états. Chaque municipalité est autonome sur le plan administratif et regroupe plusieurs villes.
Monodigestion	Digestion d'un seul substrat.
Siccité	Pourcentage massique de matière sèche dans un mélange.
Riviera Maya	Zone touristique s'étalant sur 130 km de Puerto Morelos à Tulum le long de la Mer des Caraïbes.
<i>Upwelling</i>	Remontée des eaux de fond froides et riches en nutriments.



## Liste des figures et tableaux

Figure 1.1 : Localisation de la péninsule du Yucatan et de ses trois états (Quintana Roo, Yucatan, Campeche).....	4
Figure 1.2 : Ensemble de deux photographies de la ville de Punta Cancún, en 1970 (gauche) et en 2015 (droite), montrant le développement touristique sur les dunes. ....	9
Figure 2.1 : Sargassum natans et Sargassum fluitans, deux algues brunes pélagiques.....	11
Figure 2.2 : Schéma simplifié du déplacement normal des sargasses. ....	12
Figure 2.3 : Répartition des sargasses dans le golfe du Mexique et l'océan Atlantique.....	14
Figure 2.4 : Observations satellites de l'indice maximal de chlorophylle dans l'océan Atlantique. .	16
Figure 2.5 : Abondance des sargasses dans l'océan Atlantique sur la période février à août depuis 2015. ....	19
Figure 2.6 : Ensemble de deux photographies de sargasses échouées sur les côtes du Quintana Roo. ....	20
Figure 2.7 : Impacts des échouages de sargasses sur les prairies marines du littoral du Quintana Roo. ....	25
Figure 3.1 : Les grandes étapes de la dégradation de la matière organique grâce au processus de méthanisation.....	36
Figure 3.2 : Possibilités de traitement du digestat pour sa valorisation.....	38
Figure 4.1 : Distribution spatiale de la surface de sargasses cumulée sur la période janvier 2016 à mars 2019 dans Caraïbes mexicaines. ....	48
Figure 4.2 : Biomasse quotidienne moyenne déposée par les marées sur une plage de Puerto Morelos.....	49
Figure 4.3 : Distribution spatiale de la fréquence d'occurrence des nappes de sargasses dans Caraïbes mexicaines pour la période janvier 2016 à mars 2019. ....	51
Figure 4.4 : Photographie d'une pelle mécanique hydraulique utilisée pour le ramassage des sargasses.....	55
Figure 4.5 : Photographie d'un ratisseur attaché à un tracteur pour le ramassage des sargasses. .	56
Figure 4.6 : Photographie du véhicule automoteur d'AXINOR. ....	58

Figure 4.7 : Photographie du Cane Loader utilisé habituellement dans les plantations de cannes à sucre. ....	59
Figure 4.8 : Photographie de la technique de grutage avec une benne grillagée. ....	61
Figure 4.9 : Photographie d'un râteau goémonier.....	62
Figure 4.10 : Ensemble de trois photographies de barrages flottants.....	64
Figure 4.11 : Photographie d'une barge de collecte dans les eaux côtières.....	67
Figure 4.12 : Photographie d'une drague aspiratrice en marche (DAM).....	69
Figure 4.13 : Ensilage d'herbe.. ....	73
Figure 4.14 : Utilisation des méthodes de collecte des sargasses en fonction des conditions du terrain. ....	79
Figure 4.15 : Processus de méthanisation, de la collecte de la biomasse jusqu'à l'utilisation des produits de la digestion. ....	81
Tableau 1.1 : Présentation de quelques indicateurs socioéconomiques des trois états de la péninsule du Yucatan (Campeche, Yucatan et Quintana Roo) au Mexique. ....	6
Tableau 2.1 : Signes cliniques de toxicité du sulfure d'hydrogène H <sub>2</sub> S chez l'humain. ....	21
Tableau 3.1 : Récapitulatif des différents prétraitements existants.....	33
Tableau 3.2 : Potentiels méthanogènes de certaines macroalgues.. ....	41
Tableau 4.1 : Récapitulatif des avantages et inconvénients de la collecte manuelle.....	53
Tableau 4.2 : Récapitulatif des avantages et inconvénients de la collecte mécanique grâce aux pelles mécaniques hydrauliques.....	56
Tableau 4.3 : Récapitulatif des avantages et inconvénients de la collecte mécanique grâce au ratisseur.....	57
Tableau 4.4 : Récapitulatif des avantages et inconvénients de la collecte mécanique grâce au véhicule de ramassage d'AXINOR.....	59
Tableau 4.5 : Récapitulatif des avantages et inconvénients de la collecte mécanique grâce au Cane loader.....	60
Tableau 4.6 : Récapitulatif des avantages et inconvénients de la collecte mécanique grâce au grutage.....	62
Tableau 4.7 : Récapitulatif des avantages et inconvénients du râteau goémonier comme aide à la collecte mécanique.....	63

Tableau 4.8 : Récapitulatif des avantages et inconvénients des barrages flottants artisanaux. ....	66
Tableau 4.9 : Récapitulatif des avantages et inconvénients des barrages flottants industriels. ....	66
Tableau 4.10 : Récapitulatif des avantages et inconvénients des barges à tapis convoyeur pour la collecte des sargasses. ....	68
Tableau 4.11 : Récapitulatif des avantages et inconvénients des dragues aspiratrices en marche (DAM) pour la collecte des sargasses. ....	70
Tableau 4.12 : Récapitulatif des avantages et inconvénients du séchage solaire comme méthode de préservation des sargasses. ....	72
Tableau 4.13 : Récapitulatif des avantages et inconvénients de l'ensilage comme méthode de préservation des sargasses. ....	74

## Introduction

Depuis le début de l'ère industrielle, l'influence de l'humain sur son milieu est devenue telle qu'il s'est transformé en une force géologique capable de modifier la biosphère, l'atmosphère, l'hydrosphère et la lithosphère. La Terre est entrée dans une nouvelle époque géologique, l'Anthropocène. L'avènement de l'ère industrielle depuis le XIX<sup>e</sup> siècle s'est accompagné de la mécanisation de l'agriculture et de l'utilisation généralisée d'engrais chimiques pour augmenter la production de denrées alimentaires. Cependant, le lessivage des sols agricoles ainsi que les rejets de nitrate et de phosphate ont enrichi les rivières et les eaux côtières accélérant l'eutrophisation des eaux.

L'eutrophisation des eaux s'accompagne généralement du développement rapide d'algues. En effet, leur croissance est souvent limitée par l'un de ces deux nutriments, nitrate en mer et phosphate en eau douce, mais l'apport de ces nutriments leur permet alors de se développer très rapidement. Les algues ont des rôles très importants dans les écosystèmes puisqu'elles sont les producteurs primaires à la base des chaînes trophiques de la vie aquatique. Elles filtrent l'eau, fixent le dioxyde de carbone et fournissent du dioxygène. Cependant, le développement très rapide de certaines algues peut être néfaste lors de leur décomposition privant le milieu d'oxygène. C'est le cas des efflorescences d'ulves (*Ulva sp.*) à l'origine du phénomène de marées vertes ayant lieu en Europe, aux États-Unis et en Asie (Smetacek et Zingone, 2013; Ye et al., 2011). D'autres phénomènes similaires existent. Par exemple, dans les Caraïbes, ce sont des tapis de sargasses (*Sargassum sp.*) qui se déposent en grande quantité sur les plages et donnent à l'eau des teintes orangées (Gower, Young & King, 2013; Smetacek & Zingone, 2013).

Les tapis d'algues et leur décomposition ont de forts impacts sur les systèmes écologiques et socioéconomiques puisqu'ils provoquent des émanations toxiques de sulfures d'hydrogène pouvant modifier la composition faunique (Gamenick *et al.*, 1996). Ils diminuent drastiquement la disponibilité en oxygène créant des conditions hypoxiques à anoxiques dans les eaux côtières (van Tussenbroek et al., 2017) et altèrent les écosystèmes marins côtiers (Cabanillas-Teran *et al.*, 2019; van Tussenbroek *et al.*, 2017). Ils génèrent aussi une pollution visuelle et olfactive avec des

répercussions sur le tourisme, donc l'économie locale (Reza & Meraz, 2019), la pêche (McDiarmid, 2012), ainsi que sur les conditions sanitaires (Resiere *et al.*, 2018).

Des initiatives sont mises en œuvre pour faire face à ces efflorescences, avec par exemple en France, la mise en place d'une bioraffinerie de valorisation des ulves (ter Beek, 2013) ou le lancement d'autres filières de valorisation. Bien que la recherche s'intéresse à différents procédés de valorisation notamment pour la production de biocombustibles (Chen *et al.*, 2015), les actions menées semblent se limiter le plus souvent au ramassage et au compostage. Le réchauffement climatique et l'eutrophisation des eaux risquent d'augmenter l'apparition des efflorescences puisque la température est un facteur clé favorisant la reproduction de ces algues (Gao *et al.*, 2017). Il est donc pertinent de s'intéresser aux solutions de valorisation.

Le sud-est du Mexique n'est pas exempté de ces efflorescences d'algues. Les côtes de l'état du Quintana Roo, dans la péninsule du Yucatan (figure 1.1), reçoivent de façon répétée chaque année depuis 2014 une importante quantité de sargasses, des algues brunes pélagiques, en provenance de l'Atlantique équatorial (Putman *et al.*, 2018). Durant les quatre mois d'échouage les plus importants de la période été 2014 — début de l'hiver 2015, la côte du Quintana Roo a reçu en moyenne  $2\,360\text{ m}^3.\text{km}^{-1}$  par mois de *Sargassum fluitans* et *S. natans* (Rodríguez-Martínez *et al.*, 2016) soit environ l'équivalent d'une piscine olympique de deux mètres de profondeur. Comme ailleurs, la décomposition de ces algues sur les plages nuit aux écosystèmes côtiers déjà fragilisés par les activités touristiques. Les impacts des algues s'étendent aussi à la santé humaine et à l'industrie touristique, moteur économique de la région (Bajo Palabra, 2019; Rodríguez-Martínez *et al.*, 2019). Bien que ces afflux massifs de sargasses soient un réel problème, ils constituent aussi une opportunité pour le Mexique puisque les sargasses peuvent être utilisées pour la fabrication de produits biochimiques, d'aliments pour animaux, de denrées alimentaires, d'engrais et de combustibles (Milledge & Harvey, 2016a). Dans le cadre de la valorisation de l'échouage des sargasses, la récolte et l'utilisation de ces algues bénéficieraient aux écosystèmes côtiers touchés en retirant une source de contamination et d'eutrophisation tout en faisant une ressource économique.

Dans ce contexte, cet essai a pour objectif principal d'explorer la valorisation des sargasses grâce à la production de biogaz. Il vise à qualifier les flux s'échouant sur les berges et présenter le processus de méthanisation des macroalgues. Il doit aussi identifier les méthodes de ramassage et de stockage des algues et les analyser qualitativement pour formuler des recommandations permettant de limiter les dommages aux écosystèmes.

Afin d'atteindre ces objectifs, le présent travail est divisé en quatre chapitres. Dans la première section est présenté le contexte socioéconomique et écologique particulier de l'état du Quintana Roo au sein de la péninsule du Yucatan. Le deuxième chapitre se concentre quant à lui sur la description de la crise des sargasses. Il développe l'origine des algues et offre un aperçu des échouages sur les côtes des Caraïbes et du Quintana Roo depuis 2011. Il détaille les impacts sanitaires, socioéconomiques et écologiques générés par ces affluences massives d'algues et expose leurs nombreuses utilisations potentielles. Dans le chapitre 3, l'accent est mis sur la méthanisation des sargasses comme une solution de valorisation. Cette section présente le processus de méthanisation, les bénéfices que pourraient en tirer les écosystèmes, les résultats obtenus avec d'autres espèces de macroalgues, dont les sargasses, ainsi que les défis que pose la digestion anaérobie de ces sargasses. Afin d'atteindre les objectifs fixés, le dernier chapitre est centré sur la gestion de flux et expose les volumes de sargasses échoués sur les dernières années. Il détaille les méthodes de récolte et de stockage, leurs impacts sur l'environnement ainsi que les cosubstrats disponibles afin de présenter des recommandations réalistes.

## Chapitre 1

### Le Quintana Roo dans la péninsule du Yucatan

La péninsule du Yucatan est la région du sud-est du Mexique composée des trois états les plus à l'est : Campeche, le Yucatan et le Quintana Roo (Figure 1.1). Avec 300 km de long pour 250 km de large, la péninsule du Yucatan s'étend sur 140 000 km<sup>2</sup>, entourée au nord et à l'ouest par le golfe du Mexique et à l'est par la mer des Caraïbes. La région doit sa renommée internationale et son développement socioéconomique au climat tropical, aux ruines archéologiques mayas et aux plages qui attirent chaque année plus de dix millions de touristes. Cet essor s'est cependant réalisé au détriment des écosystèmes et de la biodiversité locale.



Figure 1.1 : Localisation de la péninsule du Yucatan et de ses trois états (Quintana Roo, Yucatan, Campeche). Modifié de : Burton (2010).

## 1.1. Contexte socioéconomique

La péninsule du Yucatan n'est pas la région du Mexique la plus densément peuplée ou la plus dynamique d'un point de vue économique, car elle concentre seulement 4,5 millions d'habitants pour 152 000 km<sup>2</sup> et sa densité de population de 34 hab/km<sup>2</sup> correspond à la moitié de celle du pays. Malgré tout, elle dispose de caractéristiques, comme la présence de pétrole dans le golfe du Mexique ou de plages de sable fin, dont les trois états ont su tirer avantage afin de développer leurs économies. En 2016, la péninsule contribuait à 7,4 % du PIB national (INEGI, 2016) pour trois des trente-deux états du Mexique. Dans ce total, l'état de Campeche compte pour plus de la moitié avec environ 4,2 %, soit 570 000 millions de pesos (42 500 millions dollars CAD) en 2015 (INEGI, 2017a). Le Yucatan, lui, totalise 1,5 % pour 204 000 millions de pesos (13 300 millions CAD) en 2015 (INEGI, 2017b). Enfin, le Quintana Roo représente 1,6 % du PIB national soit près de 224 000 millions de pesos (14 700 millions CAD) en 2015 (INEGI, 2017).

L'économie du Quintana Roo est menée par le tourisme et ses 13 millions de visiteurs annuels. À eux seuls, les « services d'hébergement temporaire et de préparations de boisson et repas » ont contribué pour 50 000 millions de pesos dans le PIB de l'année 2015 (16,5 % du PIB de l'état). Ils sont aussi la principale source d'emploi et embauchent 20 % de la population active. Le « commerce » se positionne en seconde position avec 40 000 millions de pesos et 20 % de la population active. L'agriculture y est moins développée que dans les deux autres états de la péninsule et ne canalise que 5 % de la population active pour une production de richesse inférieure à 1 % du PIB. Le secteur secondaire y est aussi moins développé : 12 % de la population active et 15 % du PIB (INEGI, 2017). Ce choix du développement touristique du Quintana Roo s'est manifesté à la fin des années 60 avec le Plan national pour le tourisme. Les villages de pêcheurs de la côte sont alors transformés en un énorme centre touristique s'étalant de Puerto Morelos à Tulum (Figure 1.1) et aujourd'hui connus dans le monde entier comme la Riviera Maya. Elle est alors devenue une importante source de revenus pour l'état et un bassin d'emploi majeur pour la population. Le développement touristique de la région s'est accompagné d'un accroissement phénoménal de la population : l'état est passé de moins de 10 000 habitants en 1910 à 27 000 en 1960 (Barajas, 1995) puis à 500 000 en 1990 pour finalement arriver à 1,5 million d'habitants en 2015 (INEGI, 2015). Bien que la population du Mexique ait aussi augmenté sur cette période, le taux d'accroissement du



Quintana Roo correspond au triple de celui du Mexique avec 8,90 % par an sur la période 70-90. Un exemple de cette explosion démographique est la ville de Cancún (Figure 1.1), centre du développement touristique, qui ne comptait que 393 habitants en 1970, puis 41 330 en 1980, pour finalement atteindre 167 730 en 1990, soit une augmentation de 36 % par an (INEGI, 2015). Cependant, le développement de ces villes touristiques, à l'image de Cancún ou Playa del Carmen, a contribué à fragiliser les écosystèmes côtiers sur lesquels elles se sont implantées.

**Tableau 1.1 : Présentation de quelques indicateurs socioéconomiques du Quintana Roo au Mexique.**

Quintana Roo				
Surface (km²)	Population (Nombre d'habitants)	Densité de la population (Habitants/km²)	Population active (Nombre de personnes actives)	
50 512	1,5 million	30	800 000	
PIB en 2015 (En millions de pésos)	PIB/habitant (Pésos/habitant)	Principaux moteurs économiques		
224 100	149 000	Tourisme et commerce		
=	= 9 800 CAD/hab			
14 700 millions CAD				
Secteur Primaire (En millions de pésos et en % du PIB)	Secteur secondaire (En millions de pésos et en % du PIB)	Secteur tertiaire (En millions de pésos et en % du PIB)	Dont Commerce	Dont SHPBR
1 400	27 800	194 900	39 600	50 300
1 %	12 %	87 %	18 %	22 %

Sources : (INEGI, 2017)

## 1.2. Contexte écologique

La péninsule du Yucatan possède un climat chaud avec une saison sèche et une saison des pluies marquées correspondant à un climat de savane tropicale (« Aw ») dans la classification de Köppen (Peel *et al.*, 2016). Cependant, les précipitations et les températures varient grandement entre les différentes régions : la région autour de la ville de Campeche (État de Campeche) reçoit en moyenne 1000-1100 mm de précipitation, mais dans la région de Palizada, dans le sud-ouest du même l'état,

la pluviométrie dépasse les 1800 mm. De la même façon, la région nord de l'État du Yucatan reçoit que peu de pluie, entre 500-700 mm, alors que le centre de l'état et le Quintana Roo disposent d'un climat plus humide avec le double de précipitations (Villalobos-Zapata & Mendoza Vega, 2010). La présence de ce climat chaud et des variations dans les précipitations permet à la péninsule d'être majoritairement recouverte de forêts variées qui accueillent une flore et une faune diversifiées. L'état du Quintana Roo est principalement recouvert par des forêts tropicales (85 %) ainsi que par de la végétation hydrophile (9 %). Les milieux anthropiques (terres agricoles et d'élevage et aires urbaines) ne représentent que 6 % du territoire. Les forêts peuvent toutefois être de milieux exploités pour l'extraction de bois précieux, mais aussi pour du bois de chauffe, des plantes médicinales et de la viande issue de la chasse qui sont très importants pour certaines communautés locales (INEGI, 2017).

Afin de protéger la biodiversité riche du Quintana Roo, l'état et le pays ont mis en place un ensemble de sites protégés. L'état compte ainsi un total de 27 sites protégés : 17 pour le fédéral et 10 au provincial, avec différents degrés de protection. L'ensemble de ces sites couvre un total de 16 390 km<sup>2</sup> soit près d'un tiers de la surface du Quintana Roo. Parmi ces parcs, treize sont des sites reconnus par la Convention Ramsar qui protègent des milieux humides d'importance internationale et qui sont considérés comme des écosystèmes fondamentaux pour la conservation. Ces milieux fournissent de nombreux services écosystémiques comme la recharge des aquifères, la stabilisation du climat local et la production de ressources biologiques utilisées traditionnellement par les communautés locales (INEGI, 2017). Grâce à ces distinctions, certains complexes d'écosystèmes côtiers sont protégés permettant ainsi d'assurer leur conservation pour leur valeur intrinsèque, mais aussi pour les services écosystémiques rendus.

Le complexe côtier comprend un ensemble d'écosystèmes qui assure la transition de la terre à la mer et maintient une connectivité entre les deux milieux. Dans la zone tropicale, le complexe est constitué par les dunes, ou les mangroves, les prairies marines formées par des plantes vasculaires marines, la lagune récifale puis le récif corallien. Ces écosystèmes constituent un ensemble hautement productif et sont tous étroitement reliés : chaque écosystème joue un rôle particulier pour les autres. Les mangroves et les prairies marines filtrent et modifient la composition des nutriments présents dans l'eau. Cette filtration permet de maintenir une eau cristalline et pauvre

en nutriment favorable à la croissance des coraux et limitant la prolifération des algues en compétition pour la lumière. Les mangroves servent aussi de lieux de pontes et de développement des petits poissons, car les échasses de leurs arbres offrent une protection physique contre les prédateurs. Une fois arrivés à un stade plus avancé, ces poissons iront peupler les récifs coralliens. Ces récifs brisent les vagues au loin et protègent ainsi les dunes de l'érosion et les mangroves de la dégradation. Ils servent aussi de refuge et de lieu de vie à beaucoup d'espèces de poissons, de crustacés et de mollusques.

Les complexes côtiers sont une zone importante économiquement, car les récifs coralliens produisent près de 25 % des poissons pêchés par les pays émergents malgré leur faible surface à l'échelle mondiale (0,1 % des océans). Ils permettent de protéger les zones côtières, de fournir de la nourriture au travers de la pêche, du matériel de construction ou encore des produits pharmaceutiques (Lara-Lara *et al.*, 2008). Dans le cas du Quintana Roo, le récif offre une protection face aux événements extrêmes tels que les tempêtes et ouragans récurrents dans la région. Ainsi, il aurait réduit les dommages de l'ouragan Dean (2007) de près de 43 % et prévient chaque année la mort de 4 600 personnes et des dommages aux bâtiments et aux hôtels de l'ordre de 60 millions de dollars (Reguero *et al.*, 2019).

Cependant, l'interdépendance de ces écosystèmes rend aussi l'ensemble fragile : la modification ou la destruction de l'un de ses éléments a d'importantes conséquences sur les autres. Ainsi, la destruction des mangroves ou des prairies marines et l'augmentation des nutriments dans les eaux entourant les récifs favorisent la prolifération des algues qui entrent en compétition avec les coraux pour la lumière. Ces derniers n'ont alors petit à petit plus accès à la lumière et meurent, changeant totalement l'écosystème initial. En parallèle, la disparition du récif entraîne une diminution de son rôle de protection et augmente le phénomène d'érosion des berges qui menace les dunes et la côte.

Bien que ces écosystèmes soient les plus productifs, ils sont aussi les plus menacés au monde. Au Mexique, les complexes côtiers sont touchés par la perte d'habitat sur les dunes et les falaises et par la disparition des milieux humides. Ces phénomènes ont pour origine la déforestation et le changement d'utilisation du sol pour le développement urbain, touristique et portuaire (Lara-Lara *et al.*, 2008). La région de la Riviera Maya, la région de Puerto Morelos à Tulum (Figure 1.1), a connu

de très fortes pressions lors de l'exécution du Plan national pour le Tourisme puisqu'aucune protection n'existait alors pour protéger les côtes. L'un des plus beaux exemples est le cas de Punta Cancún, la partie la plus au nord de la zone hôtelière de la ville de Cancún (Quintana Roo) (Figure 1.2). L'équilibre entre accrétion et érosion était maintenu par l'existence des dunes jusqu'à l'installation des hôtels (Escudero-Castillo *et al.*, 2018). Le développement hôtelier sur les dunes, la mauvaise gestion des structures de protection ainsi que la destruction des prairies marines et des récifs coralliens ont contribué, en plus des causes naturelles, à rompre cet équilibre. Aujourd'hui, elles sont parmi les principales causes anthropiques de l'accentuation de l'érosion des côtes (Escudero-Castillo *et al.*, 2018). Le problème d'érosion est tel qu'il a forcé les autorités à apporter du sable pour maintenir la largeur des plages en 2006 et 2009 (Aldana *et al.*, 2009).

Le tourisme a aussi eu des conséquences significatives sur la qualité de l'eau en augmentant la concentration en azote dans les eaux côtières des grands pôles touristiques (Baker *et al.*, 2013). Cette augmentation expliquerait une grande partie de la modification de la croissance des coraux ayant eu lieu aux alentours. Le développement urbain et touristique de la côte semble donc être à l'origine des changements dans les systèmes récifaux qui ont perdu en couverture corallienne de 1980 à 2000. Malgré une légère amélioration sur la période 2000 à 2010, les récifs coralliens de la région restent des écosystèmes fragilisés notamment en raison des activités anthropiques, des épisodes de blanchissement, des maladies et des dommages causés par les ouragans (Rioja-Nieto & Álvarez-Filip, 2019).



**Figure 1.2 : Ensemble de deux photographies de la ville de Punta Cancún, en 1970 (gauche) et en 2015 (droite), montrant le développement touristique sur les dunes.** Source : Reportur, 2019; Théry, 2018.

Avec son économie basée sur le tourisme et des écosystèmes fragilisés, l'apparition des affluences massives de sargasses depuis 2014 peut constituer un danger pour le tissu socioéconomique, mais aussi pour les écosystèmes côtiers du Quintana Roo.

## Chapitre 2

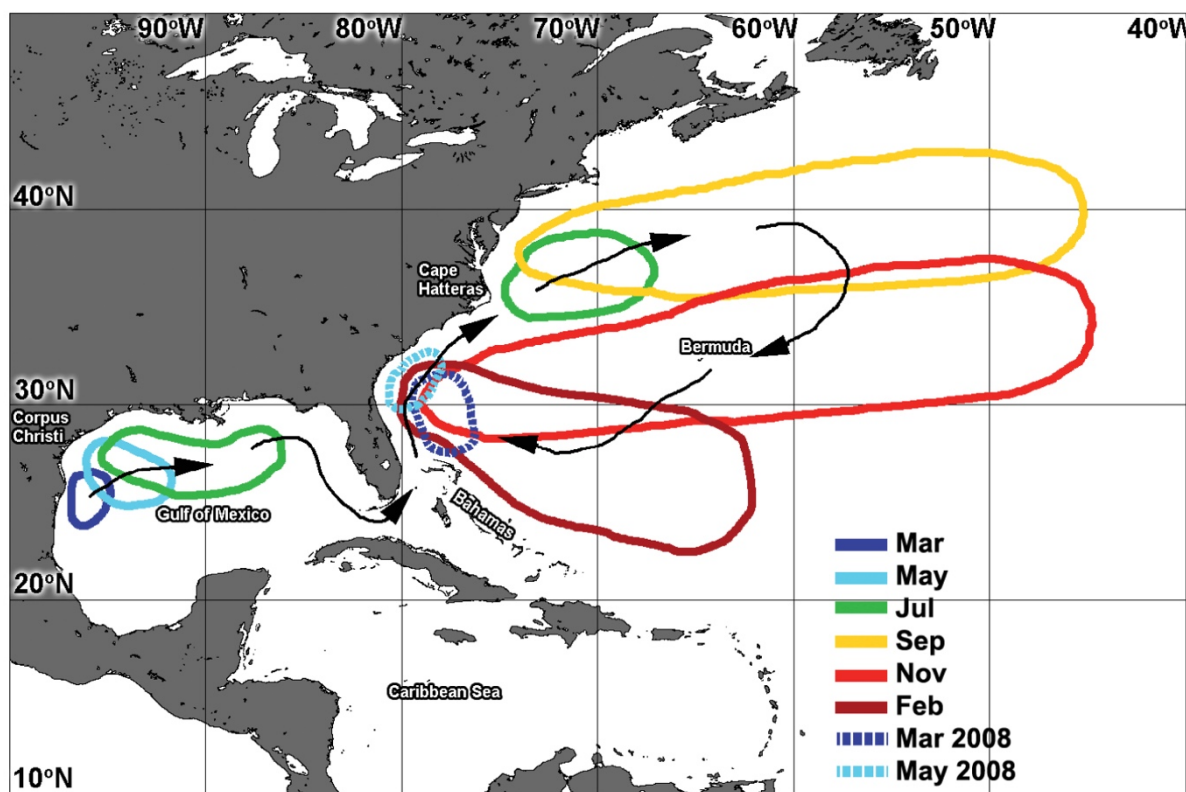
### La crise des sargasses

Les sargasses (*sargazo* en espagnol) *Sargassum natans* et *Sargassum fluitans* sont deux espèces de macroalgues brunes pélagiques retrouvées dans l'océan atlantique (Figure 2.1). Très similaires, elles se différencient principalement par la morphologie de leurs feuilles et la présence ou non de structures épineuses. *Sargassum natans* a une structure de feuilles fines, tandis que le *Sargassum fluitans* possède de grandes feuilles lancéolées et des structures épineuses qui la différencient de *S. natans*. Grâce à leurs poches d'air, elles flottent à la surface de l'eau et forment des radeaux ou des nappes qui dérivent au gré des courants et des vents. Ces tapis sont de véritables oasis marines : ils constituent la structure d'un écosystème particulier et diversifié de pleine mer qui abrite plus de 145 espèces d'invertébrés et plus de 127 espèces de poissons. Ils constituent un lieu important de frai, de nurserie et d'alimentation pour les poissons, les tortues et les oiseaux marins (Freestone *et al.*, 2016). Ces tapis de sargasses ont une durée de vie réduite d'un an (Gower & King, 2011). Dans des conditions normales, ils se forment dans le nord du golfe du Mexique pour une biomasse totale d'une mégatonne (Figure 2.2). Ces tapis sont ensuite dirigés par les courants vers les Caraïbes puis vers leur destination finale : la mer des sargasses où la biomasse algale double en une cinquantaine de jours (Lapointe *et al.*, 2014). Au cours de ce déplacement, certains tapis s'échouent naturellement sur les plages du golfe du Mexique.



**Figure 2.1 : *Sargassum natans* et *Sargassum fluitans*, deux algues brunes pélagiques.** Les points jaunes montrent les feuilles et les poches d'air des deux espèces de sargasses. Source : Illustration : Child (1991) Photographie : Huckbody (2016)

Ces échouages ont cependant augmenté en quantité, en fréquence et en durée depuis 1970 (SEMARNAT, 2017). Cette augmentation serait liée à l'augmentation des nutriments dans le fleuve Mississippi (Lapointe, 1995) entraînant une eutrophisation des eaux littorales dans lesquelles se développent les sargasses. L'augmentation de la charge nutritive des eaux aurait permis à *S. natans* et *S. fluitans* de se multiplier en étant beaucoup moins limitées par la disponibilité en phosphate (Lapointe, 1986, 1995). L'une des années les plus importantes d'échouages de sargasses est l'année 2001 durant laquelle la biomasse échouée de Trinidad (Cuba) à la République dominicaine était 200 fois plus importante que les années précédentes. Depuis 2011, les échouages massifs sont devenus un phénomène régulier dans l'ensemble des Caraïbes (SEMARNAT, 2017), mais l'origine des algues a changé. C'est le début de la crise des sargasses.



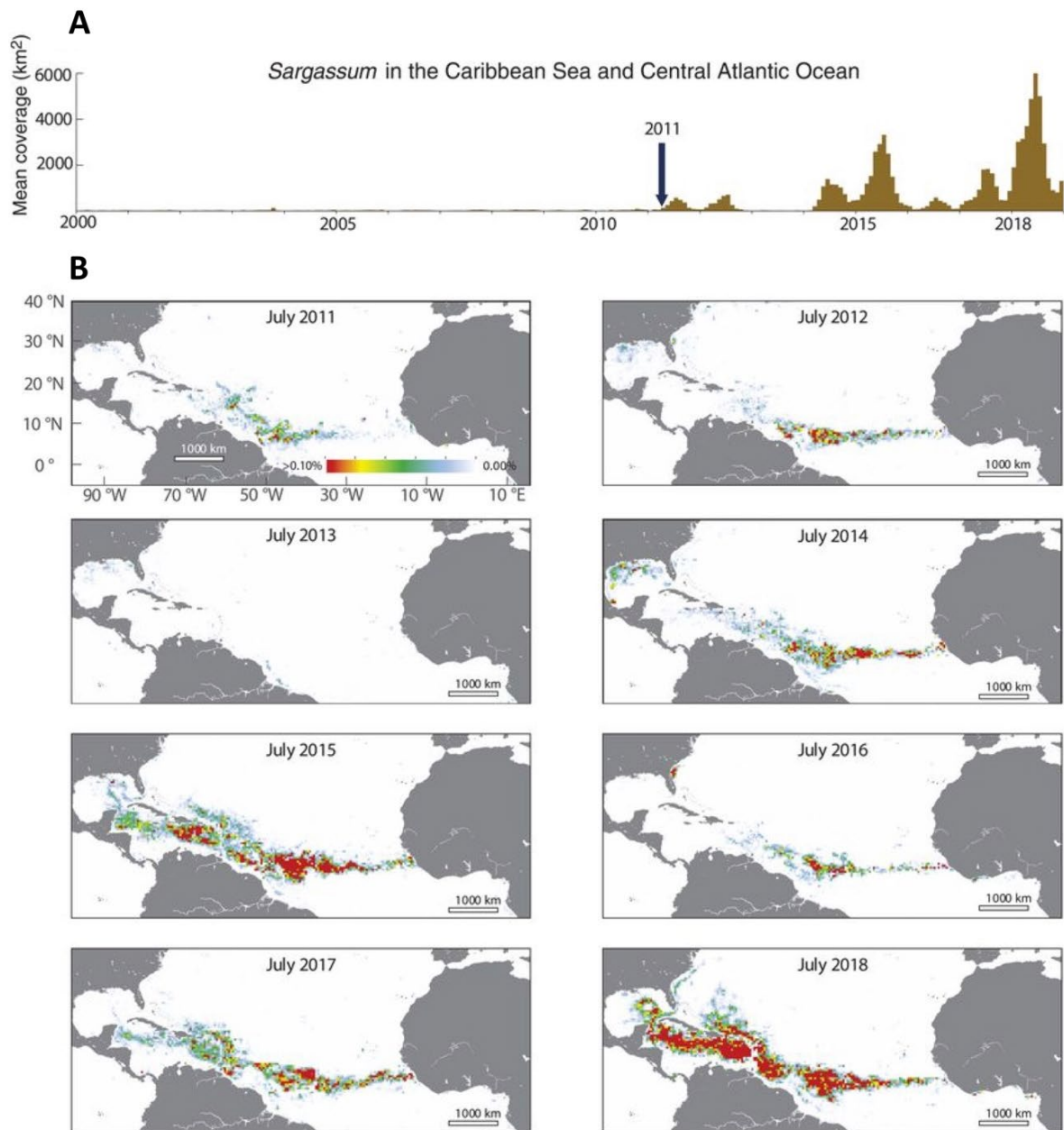
**Figure 2.2 : Schéma simplifié du déplacement normal des sargasses.** Source : Gower & King (2011).

## 2.1. Origine géographique et causes des affluences de sargasses

L'origine de ces nouvelles affluences de sargasses a d'abord été attribuée à la mer des sargasses, puisque *S. natans* et *S. fluitans* s'échouent régulièrement sur les côtes du golfe du Mexique et des Caraïbes. Cependant, l'augmentation importante entre 2010 et 2011 de l'indice maximal de chlorophylle mesuré au large du Brésil (Gower *et al.*, 2013) a attiré l'attention des chercheurs et a finalement remis en cause cette hypothèse : les données satellites montrent une nouvelle zone d'origine. Il semblerait donc que dorénavant les sargasses proviennent de la région océanique située au large du nord-est du Brésil, entre l'équateur et 10° N et entre 50° O et 25° O, appelée la Région de recirculation nord équatorial. Dans cette région, *S. fluitans* et *S. natans* ont été observées en faibles quantités dans les dernières années. Elles se sont multipliées et accumulées récemment au point de former une nouvelle mer des sargasses (Figure 2.3), parfois appelée « la grande ceinture de sargasses de l'Atlantique » ou « the great Atlantic Sargassum belt » dans sa version anglaise.

Cette région a été identifiée par Wang *et al.* (2019) grâce à l'analyse d'images satellites comme la plus grande étendue d'algues au monde. En juin 2018, elle a atteint une surface record de 8850 km<sup>2</sup> s'étendant du golfe du Mexique jusqu'à l'Afrique de l'Ouest pour une biomasse algale estimée à plus de 20 millions de tonnes. Depuis cet endroit, les sargasses sont ensuite dirigées vers les Caraïbes grâce à trois grands courants : le courant de Guyane, les anneaux nord du Brésil et le courant équatorial de la rétroflexion du courant du Brésil (Putman *et al.*, 2018). La quantité de sargasses suivant chaque itinéraire varie selon les saisons et ceci a des répercussions sur le temps que prennent les sargasses pour atteindre la mer des Caraïbes.





**Figure 2.3 : Répartition des sargasses dans le golfe du Mexique et l'océan Atlantique. (A)** Couverture mensuelle (km<sup>2</sup>) moyenne de la surface de Sargassum dans la mer des Caraïbes et l'océan Atlantique central de 2000 à 2018. **(B)** Densité moyenne mensuelle (%) de Sargassum pour le mois de juillet de 2011 à 2018. L'échelle va du blanc, densité nulle, au rouge pour une forte densité. Source : Wang *et al.* (2019).

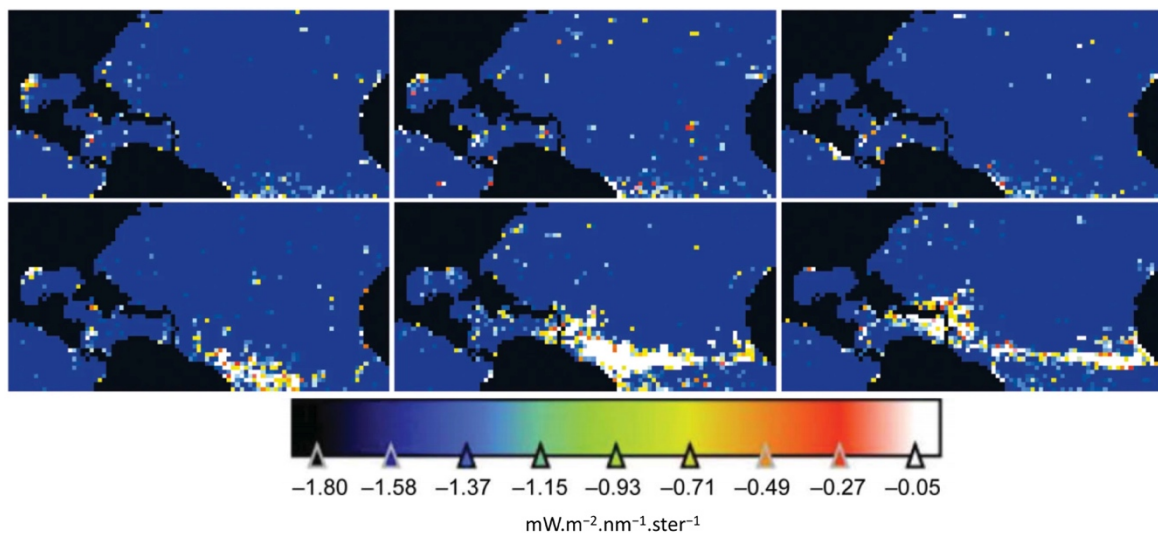
La multiplication exponentielle des sargasses dans cette partie de l'océan serait le résultat de plusieurs facteurs. Tout d'abord, il semblerait que des conditions favorables à la multiplication des sargasses aient été formées grâce aux températures de surface exceptionnellement élevée dans la région sur la période 2010-2011 (Djakouré *et al.*, 2017). Le deuxième facteur mis en avant pour expliquer les efflorescences de sargasses est l'augmentation de la concentration des nutriments dans l'eau. Les rivières et les fleuves sont une des sources de ces nutriments en mer. Les principaux fleuves bordant le trajet des sargasses, à savoir les fleuves Amazone, Orénoque et Congo, n'ont pas subi de changement de débit majeur pouvant expliquer les efflorescences d'algues (Djakouré *et al.*, 2017). Cependant, les apports continentaux de nitrates et de phosphates de ces fleuves et en particulier de l'Amazone ont augmenté, ce qui pourrait expliquer les efflorescences (Djakouré *et al.*, 2017; Oviatt *et al.*, 2019). En effet, les concentrations en nutriments les plus élevées ont été atteintes durant les années d'échouages exceptionnels (2011, 2012, 2014, 2015, 2018). Les chercheurs soulignent que cette augmentation des nutriments pourrait être associée à la déforestation, à l'augmentation des sédiments et au ruissèlement continental observés dans les dernières années. L'augmentation de la charge en phosphate et nitrate pourrait aussi s'expliquer par le développement des activités agro-industrielles et urbaines. La forte disponibilité de ces nutriments normalement limitants et l'augmentation de la température de surface de l'eau permettraient donc aux algues de multiplier rapidement leur biomasse.

Si le rôle de la charge nutritive est accepté par beaucoup, la question de la température semble cependant remise en question par d'autres chercheurs comme Wang *et al.* (2019) qui expliquent principalement ce développement algal par l'augmentation de la disponibilité en nutriments. En effet, ils soulignent qu'en 2009 et 2010 les conditions étaient favorables pour la croissance des sargasses : l'Amazone a rejeté plus de nutriment qu'à l'accoutumée et l'*upwelling* a fait remonter des eaux riches en nutriment ce qui aurait dû favoriser la multiplication des sargasses. Cependant, aucune efflorescence massive n'a été observée en 2010 et les chercheurs mettent cela en relation avec des températures de surface observées relativement élevées. En effet, selon leurs expériences en laboratoire et leur analyse des images satellites, cette augmentation de la température ralentirait grandement la croissance de *S. fluitans* et *S. natans*. L'année suivante, les températures de surface plus adéquates et la présence des nutriments apportés au cours de l'année auraient ainsi permis de

créer les conditions pour la multiplication des algues qui se seraient échouées sur les plages des Caraïbes par la suite.

## 2.2. Aperçu des échouages massifs dans les Caraïbes et sur les côtes du Quintana Roo depuis 2011

À l'été 2011, de très grandes quantités de sargasses s'échouent sur les côtes des Caraïbes centrales, de Trinidad à la République dominicaine, et sur les côtes africaines de la Sierra Léon au Ghana (Smetacek & Zingone, 2013). Dans leur étude Gower *et al.* (2013) ont estimé l'importance de cet échouage par rapport aux précédentes années en mesurant l'indice maximal de chlorophylle sur des images MERIS (MEdium Resolution Imaging Spectrometer) (Figure 2.4). Cette année-là, le pic d'échouage en juillet était 200 fois plus élevé que les pics moyens des 8 années précédentes dans la région. Les côtes des îles du sud des Caraïbes touchées n'auraient jamais vécu d'évènement de cette ampleur (Hemphill, 2011; tiré de Smetacek & Zingone, 2013).



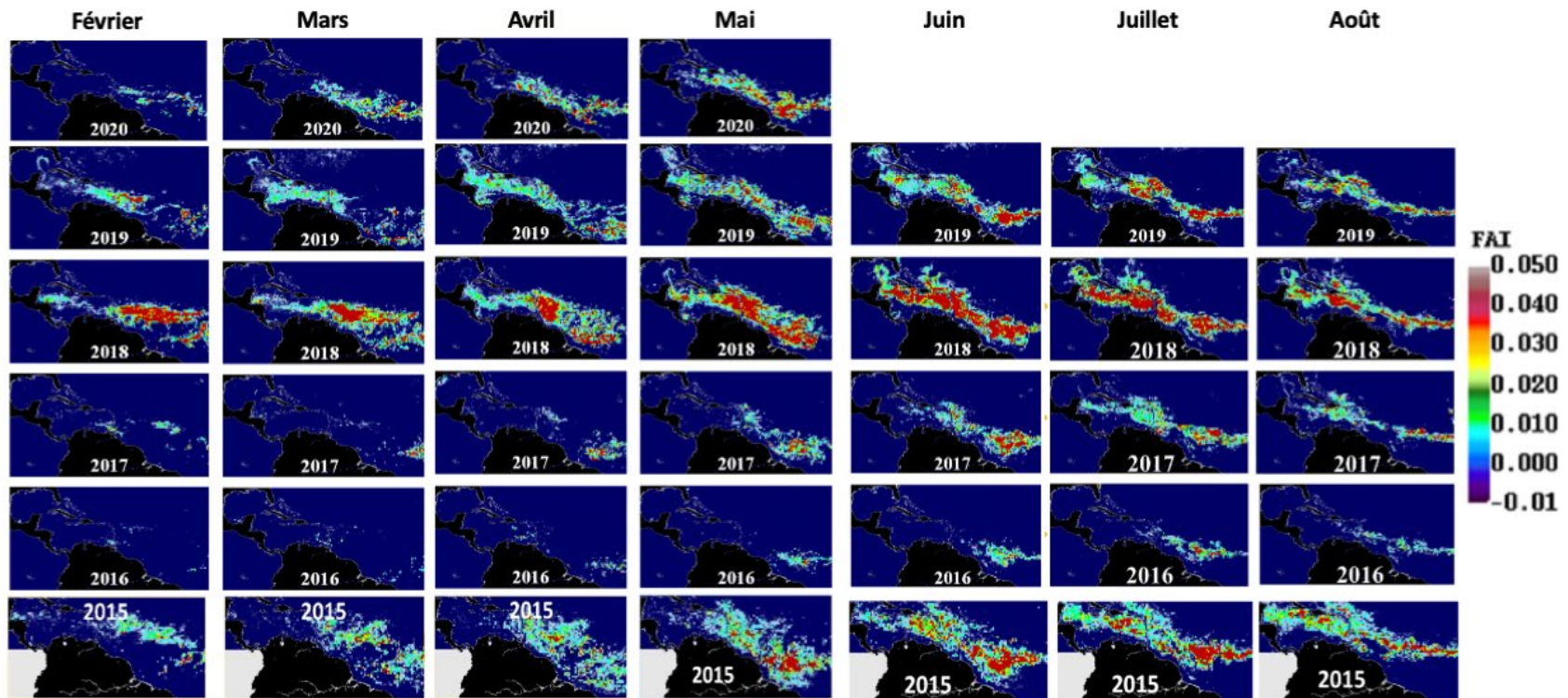
**Figure 2.4 : Observations satellites de l'indice maximal de chlorophylle dans l'océan Atlantique.** La légende va du noir au blanc et représente la radiance de la surface. Les terres émergées sont présentées en noir et les océans en bleu. Les concentrations élevées de chlorophylle, représentant les concentrations de sargasses, tendent du jaune vers le blanc. En haut sont représentées les observations d'une année moyenne et en bas les observations réalisées en 2011, une année spectaculaire, pour les mois de mai, juillet et septembre. Source : Gower *et al.* (2013)

Cet évènement exceptionnel s'est répété les années suivantes et a gagné d'autres régions des Caraïbes. En mai 2012, la province de Cienfuegos dans le centre-sud de Cuba a subi elle aussi des échouages massifs provoquant l'inquiétude des baigneurs, des médias et la fermeture temporaire de la plage. Les agglomérats de sargasses formés sur le rivage pouvaient atteindre plusieurs mètres de haut, du jamais vu pour la population locale (Moreira et Alfonso, 2013). En 2014, deux ans plus tard, de nouvelles régions ont été touchées. L'île de San Andrés à 280 km à l'est du Nicaragua a rapporté l'arrivée de *S. natans* et *S. fluitans* en quantité anormalement élevée en septembre (Gavio et al., 2014). Néanmoins, cet épisode de courte durée n'a pas eu d'effet négatif majeur sur les communautés côtières. Cette même année voit aussi les premières manifestations du phénomène sur les côtes du Quintana Roo (Mexique).

Au cours de l'été 2013, les quantités de sargasses apportées par la mer sont devenues inhabituelles sur les côtes des Caraïbes mexicaines. Cela a continué durant les mois suivants pour arriver à une situation constante. C'est à l'été 2014 et jusqu'à décembre 2015 que la situation est devenue réellement préoccupante avec des conséquences sur le tourisme et les activités de conservation. En effet, les échouages ont couvert la période des vacances d'été ainsi que la période de nidification des tortues marines (mai à août) (SEMARNAT, 2017). Durant les quatre mois d'échouage les plus importants de la période 2014-2015, la côte du Quintana Roo a reçu en moyenne  $2\,360\text{ m}^3.\text{km}^{-1}$  de *Sargassum sp* par mois (Rodríguez-Martínez & van Tussenbroek, 2016) soit environ l'équivalent d'une piscine olympique de 2 mètres de profondeur.

Après l'année record de 2015, les échouages des deux années suivantes ont été moindres au Mexique, mais aussi dans le reste des Caraïbes. Ces observations, réalisées sur les plages, confirmaient les prédictions réalisées grâce à l'analyse d'images satellites (Figure 2.4). En revanche, les années 2018 et 2019 ont été, au même titre que 2015, des années records. En 2019, le Quintana Roo a récolté plus de 83 507 tonnes de sargasses sur la période d'échouage de mai à octobre sur les plages, mais aussi en haute mer (SEMAR, 2019a). Cependant, les plages en auraient reçu près d'un demi-million de tonnes (Ortega et al., 2019). L'année 2020 semblerait être aussi exceptionnelle d'après le bulletin de mai du Laboratoire d'océanographie optique de l'Université de Floride du Sud (2020) puisque la quantité sargasses en mer est estimée à 8,7 millions de tonnes, semblable à celle de mai 2015 (8,8 millions de tonnes) et mai 2019 (8,2 millions de tonnes) (Figure 2.5).

Afin de répondre à la problématique d'échouage massif de sargasses, le Mexique a mis en place en juillet 2015 un groupe de partage des connaissances sur ces échouages avec la participation de scientifiques de différentes universités mexicaines. Une commission a aussi été formée au Quintana Roo pour faire face à la crise et analyser les propositions sur les technologies de stockage, de nettoyage, de transport, d'élimination et d'utilisation des sargasses, ainsi que les propositions de réglementation. En 2018, le Plan durable pour l'arrivée anormale de sargasses a été adopté et a permis la création d'un nouveau comité permanent composé de chercheurs, universitaires et d'autres scientifiques de l'Université nationale autonome du Mexique. Ce nouveau groupe est subdivisé en trois groupes disposant chacun d'un objectif distinct : renforcer les mécanismes de collecte des sargasses, mettre en place un système de surveillance et d'alerte de l'arrivée des sargasses et étudier les possibilités d'utilisation et d'exploitation des algues à moyen et long terme (SEMARNAT, 2018a). La mise en place de la surveillance a entre autres pour objectif de permettre la planification des interventions de collecte.



**Figure 2.5 : Abondance des sargasses dans l’océan Atlantique sur la période février à aout depuis 2015.** Le FAI correspond à l’indice d’algues flottantes. La palette de couleur s’étend du bleu au blanc, les couleurs chaudes représentant une grande abondance d’algues. Source : Laboratoire d’océanographie optique de l’Université de Floride du Sud (2020).



## 2.3. Les impacts des affluences massives de sargasses

Cette section du chapitre vise à présenter les impacts socioéconomiques et écologiques des échouages massifs de sargasses sur les côtes du Quintana Roo.

### 2.3.1. Impacts sanitaires et socioéconomiques

Les sargasses sont à l'origine de plusieurs impacts sur les activités humaines. Leur présence sur les plages représente une détérioration de la qualité environnementale du paysage, particulièrement dans les mois d'échouage les plus importants (Figure 2.6).



**Figure 2.6 : Ensemble de deux photographies de sargasses échouées sur les côtes du Quintana Roo.** Source : Zamora et al. (2018)

Une fois dans les eaux littorales ou déposées sur la plage par les vagues et la marée, les algues meurent et sont dégradées de manière aérobie et anaérobie par les microorganismes. Ce deuxième processus émet dans l'environnement deux gaz toxiques que sont le sulfure d'hydrogène ( $H_2S$ ) et de l'ammoniac ( $NH_3$ ) (Préfecture de la Martinique, 2018). La gravité de l'intoxication résulte de la dose respirée et de la durée d'exposition, en cela les populations locales sont plus touchées que les touristes. Ainsi, les résidents de certaines communautés situées à proximité de la plage (<200 m) et le personnel travaillant au nettoyage des plages se sont plaints au cours de la période 2012-2015 de maux de têtes, de nausées et de problèmes respiratoires (Rodríguez-Martínez *et al.*, 2016). Ces problèmes de santé des populations sembleraient reliés au sulfure d'hydrogène dont l'exposition

prolongée à de faibles concentrations apporte ces effets notoires sur la santé (Tableau 2.1.) (Legator *et al.*, 2001).

**Tableau 2.1 : Signes cliniques de toxicité du sulfure d'hydrogène H<sub>2</sub>S chez l'humain.**

Toxicité aigüe (Exposition de courte durée)	Seuil	Effets
	100 ppm (partie par million)	Irritation des muqueuses oculaires et respiratoires se traduisant par une conjonctivite, une rhinite, une dyspnée, voire un œdème pulmonaire retardé
	500 ppm	Rapide perte de connaissance, parfois suivie d'un coma convulsif et de troubles respiratoires, d'un œdème pulmonaire et de troubles du rythme cardiaque. Décès rapide si l'exposition n'est pas interrompue.
	1000 ppm	Décès en quelques minutes
Toxicité chronique (Exposition prolongée)		<p>Au niveau du système nerveux : céphalée, fatigue, insomnie, troubles de la mémoire</p> <p>Au niveau des yeux : irritations oculaires, sensation de brûlure, inconfort et photophobie.</p> <p>Au niveau du système digestif : nausée, anorexie, douleurs abdominales et éventuellement diarrhée.</p> <p>Autres : Bronchites irritatives, irritations cutanées</p>

Source : Institut national de recherche scientifique (2014)

L'économie du Quintana Roo est aussi impactée par l'arrivée des sargasses. Comme mentionné en section 1.1, le tourisme est le premier contributeur au produit intérieur brut de l'état et correspond à la première source d'emploi. Il est concentré dans le nord de l'état, dans la région de la Riviera Maya qui commence à Puerto Morelos et s'étend sur 130 km de côte jusqu'à la ville de Tulum (Figure 1.1) où les voyageurs profitent du climat dans de grands complexes hôteliers. Les touristes sont particulièrement attirés par la région en raison des plages de sable blanc ainsi que la possibilité de visiter la barrière de corail mésoaméricaine.

L'arrivée des sargasses a eu un impact certain sur l'économie et le tourisme du Quintana Roo. En 2018, le rapport de Commission présidentielle de surveillance de l'arrivée des sargasses dans les Caraïbes mexicaines estimait les pertes financières de 5,3 milliards de pesos soit 316 millions de dollars canadiens (Guerrero, 2019) pour une perte de 2,1 % du PIB. La même année, la municipalité de Solidaridad qui comprend notamment la ville de Playa del Carmen dans le nord de l'état



(Figure 1.1) a vu le tourisme chuter de près de 35 % (Arellano, 2018). En plus du manque à gagner associé à l'absence de réservations, les hôtels et les groupes hôteliers dépensent chaque mois près de 94 400 CAD pour maintenir leur plage propre pour les touristes présents (Kavin, 2018). Le tourisme étant très important dans l'économie, le tissu socioéconomique de la région de la Riviera Maya s'en voit particulièrement affecté.

Les échouages de sargasses tendent aussi à modifier les activités des voyageurs afin d'éviter la pollution visuelle et olfactive, conséquences de la décomposition de ces algues. Casas-Beltrán *et al.* (2020) ont étudié ces changements d'activités et montrent que les touristes s'éloignent des plages pour se tourner vers l'intérieur des terres et notamment la baignade dans les cenotes, des systèmes de grottes et cavités remplies d'eau. Les impacts liés à l'afflux de touristes sont alors reportés des zones qui n'y sont pas habituées. Par exemple, les touristes contaminent ainsi les cenotes avec les crèmes solaires ce qui diminue la qualité de l'eau (Casas-Beltrán *et al.*, 2020). L'industrie touristique ne prend pas en compte les impacts de ces activités sur les systèmes naturels ou sur les communautés indigènes présentes dans les terres. Puisque l'économie de la Riviera Maya se fonde sur le tourisme, les auteurs soulèvent que la réponse du gouvernement à la crise des sargasses s'est focalisée sur l'élimination des sargasses, mais pas sur la réglementation des activités des cenotes qui demeure très faible. Celle-ci risque de nuire à long terme à l'écologie, à la qualité de l'eau de ces lieux, ainsi qu'à la souveraineté des communautés environnantes sur l'eau.

En plus des impacts économiques relatifs au tourisme, les échouages massifs de sargasses semblent avoir impacté les captures des pêcheurs locaux, un phénomène aussi observé ailleurs dans les Caraïbes. Les sargasses peuvent bloquer les hélices des bateaux, provoquer la surchauffe du moteur, abîmer les filets de pêche et limiter les captures en réduisant le nombre de sorties en mer et la quantité de poissons. De 2011 à 2018, la capture est passée de près de 5 000 tonnes de poissons de diverses espèces à 4 000 tonnes et le nombre de pêcheurs a diminué de 40 % durant cette même période (El Quintana Roo, 2019). À Punta Allen, les pêcheurs ont pêché 35 tonnes de langoustes en 2018, c'est 22 % de moins que les années précédentes et cela représente un réel manque à gagner pour les communautés de pêcheurs (Novedades Quintana Roo, 2018). La pêche du poulpe a aussi beaucoup diminué passant de 645 tonnes en 2011 à 28 tonnes pendant la saison de janvier à septembre 2018. La capture de crevettes a subi la même chute passant de 990 tonnes en 2011 à

28 tonnes déclarées en 2018 selon les registres de pêche (ElQuintana Roo, 2019). Il est toutefois important de préciser que le lien de causalité n'a pas encore été démontré. Bien que les sargasses soient pointées du doigt, il est aussi possible que la diminution des prises soit le reflet de la diminution des stocks due à la surpêche.

### 2.3.2. Impacts écologiques

Au-delà de l'aspect socioéconomique, la crise des sargasses est aussi une crise écologique. Alors qu'en pleine mer les nappes de sargasses constituent des oasis de vie, elles deviennent nocives dans les eaux côtières et sur les berges. Leur décomposition aérobie dans les eaux proches de la rive consomme l'entièreté de l'oxygène dissout dans l'eau créant ainsi des conditions hypoxiques à anoxiques (van Tussenbroek *et al.*, 2017). La putréfaction anaérobie libère ensuite dans l'eau le sulfure d'hydrogène et l'ammoniac pouvant alors modifier le pH. Ces processus de décomposition relâchent dans ces eaux d'importantes quantités de phosphates et nitrates. L'apport mensuel d'azote et de phosphore par les sargasses à la dérive est estimé respectivement à 6150 et 61 kg par kilomètre de plage quand les apports normaux sont estimés à 200 kg N km<sup>-1</sup> et 6-18 kg P km<sup>-1</sup> (Hernández-Terrones *et al.*, 2011), ce qui entraîne une eutrophisation des eaux littorales. La croissance des algues étant limitée par les apports nutritifs, la libération de phosphore et d'azote peut être à l'origine d'un cercle vicieux en augmentant leur disponibilité pour les sargasses. La turbidité a aussi fortement augmenté en raison de la grande quantité de matière organique présente dans l'eau diminuant ainsi la disponibilité de la lumière pour les organismes photosynthétiques.

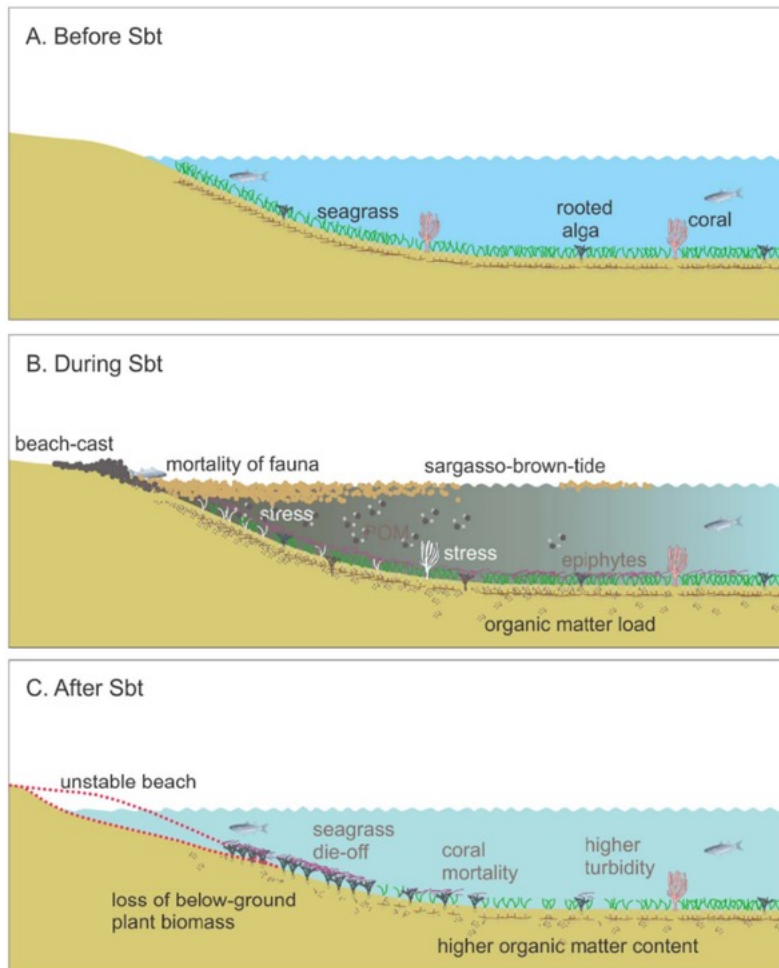
L'ensemble de ces modifications du milieu a entraîné des changements dans les prairies marines. En 2016, une grande partie de la prairie marine de Mirador Nizuc<sup>1</sup>, autrefois dominé par *Thalassia testudinum* qui couvrait 47 % de la surface de la prairie (~5700 m<sup>2</sup>) a totalement disparu. Elle a été remplacée par des algues du genre *Halimeda* et des algues épiphytes qui étaient présentes en faible proportion avant les échouages de sargasses (van Tussenbroek *et al.*, 2017). Seulement

---

<sup>1</sup> L'un des sites d'étude de van Tussenbroek *et al.*, 2017. Il est situé dans au sud de la ville de Cancún, Quintana Roo, Mexique.

une toute petite section à 30 m au large a été retrouvée intacte. Ces changements seraient le résultat de l'effet combiné de la réduction de la lumière, des conditions hypoxiques, de la concentration importante en sulfure d'hydrogène dissous, et de la température plus élevée sous les nappes de sargasses. Si les modifications des conditions environnantes ont modifié la composition des herbiers, elles n'ont pas modifié la biomasse aquatique, en revanche elle a profondément impacté les systèmes racinaires et la biomasse souterraine. Ainsi les prairies sous-marines ont perdu entre 61,6 % et 99,5 % de la biomasse souterraine passant de 1236,4 grammes de matière sèche (MS) par mètre carré à seulement 6,1 g<sub>MS</sub>.m<sup>2</sup>. Les sites de Xcalak et Xahuayxol au sud de l'état ont aussi été fortement touchés et il semblerait, d'après les connaissances locales sur l'extension antérieure des prairies sous-marines et les photographies aériennes, que ces sites ont perdu leurs prairies sous-marines jusqu'à 50 m au large. Le changement des communautés algales et la modification de leur diversité taxonomique ont entraîné des modifications dans les structures trophiques de certains animaux comme l'oursin *Diadema antillarum* (Cabanillas-Teran *et al.*, 2019). Si les afflux de sargasses s'arrêtent, le rétablissement des prairies sous-marines touchées pourra prendre des années, voire des décennies. En revanche, s'ils continuent ces changements pourraient devenir permanents. (Figure 2.7) (van Tussenbroek *et al.*, 2017).

Les échouages de sargasses ont aussi eu un impact certain sur les colonies de corail présentes dans les prairies marines. Vingt-sept pour cent des colonies connues sont mortes huit mois après le premier échouage massif de sargasses dans des zones où elles n'avaient pas été récoltées (van Tussenbroek *et al.*, 2017). Ceci semblerait lié à l'effet combiné des mêmes facteurs à l'origine des changements dans les prairies marines. Ces zones mortes ont ensuite été colonisées par diverses espèces d'algues. Les échouages viennent donc ajouter une importante pression supplémentaire à des écosystèmes déjà fragilisés par le contexte écologique et le développement des activités humaines.



Avant les échouages de sargasses (A) :

La prairie marine est bien développée atteignant presque le littoral avec des eaux claires et des animaux en bonne santé.

Pendant les échouages de sargasses (B) :

Le lixiviat et la matière organique en suspension colorent l'eau, augmentent sa turbidité et la teneur en matière organique dans les sédiments. La réduction de la lumière, l'augmentation de la charge en matière organique provoquant l'hypoxie à l'anoxie soumettent les herbiers et les coraux à un fort stress.

Après les échouages de sargasses (C) :

Les herbiers marins et les coraux proches du rivage ont été perdus. La turbidité de l'eau et la quantité de matière organique dans les sédiments sont bien supérieures à l'état initial. La disparition des prairies marines et les mauvaises pratiques de récolte des sargasses ont entraîné une érosion des berges

**Figure 2.7 : Impacts des échouages de sargasses sur les prairies marines du littoral du Quintana Roo. Source : van Tussenbroek *et al.* (2017)**

Les effets de l'échouage des sargasses touchent aussi les tortues marines qui doivent se rendre sur les plages pour pondre. Les accumulations de sargasses peuvent alors devenir une barrière difficilement franchissable d'autant plus que la période d'échouage coïncide avec la période de nidification (Burrowes *et al.*, 2019). La présence des sargasses semblerait diminuer la température des nids de tortue, ce qui entrainerait l'éclosion de plus de nouveau-nés mâles puisque la détermination du sexe est dépendante de la température (Maurer *et al.*, 2015). Les nouveau-nés doivent ensuite rejoindre la mer et faire face eux aussi à la barrière que forment les sargasses. Le ramassage mécanique des algues est aussi problématique puisqu'il peut détruire les nids de tortues en les écrasant. La destruction des nids est un problème qui s'entend aussi à d'autres espèces comme les oiseaux limicoles qui nichent sur le sable (Schultz Schiro, 2017).

Les autres groupes d'animaux marins, poissons, crustacés, échinodermes et mollusques, sont aussi touchés et lors de l'afflux massif de 2018 (mai-septembre), les rapports de mortalité de la faune indiquent que des organismes appartenant à 78 espèces ont été retrouvés morts en raison des sargasses sur les côtes du Quintana Roo (Rodríguez-Martínez *et al.*, 2019). Les poissons néritiques et les crustacés sont les groupes les plus touchés et représentent respectivement ~60 % et ~30 % des espèces mortes observés. La plupart du temps, les organismes morts sont retrouvés en petites quantités (1 à 10 individus), mais à cinq reprises de grands groupes (>100) ont pu être observés. La cause semble être l'effet combiné des conditions hypoxiques, des concentrations élevées en ammonium et en sulfure d'hydrogène.

Bien que les échouages de sargasses constituent un problème d'ampleur pour les régions touchées, la recherche tente de leur trouver des utilisations potentielles afin de les valoriser en tant que ressources permettant ainsi de financer leur récolte et de limiter leurs impacts sur l'économie, la population et l'environnement.

## **2.4. Les utilisations potentielles**

L'intérêt de la recherche pour les utilisations potentielles des sargasses a explosé avec la crise des sargasses et la prolifération de *S. muticum* dans le monde. Les utilisations potentielles du genre *Sargassum* s'élargissent désormais à d'autres secteurs que la production d'énergie. Les sargasses

pourraient ainsi avoir de la valeur en tant que fertilisant. Silva *et al.* (2019) ont identifié des qualités de biofertilisant végétal à une autre algue du genre *Sargassum*, *S. muticum*. Les extraits de cette algue ont un effet positif sur la germination des graines et le développement des plants de laitue (*Lactuca sativa*) à une concentration de 25 %. De leur côté Hernández-Herrera *et al.* (2014), ont aussi testé le rôle biostimulant des extraits de différentes macroalgues, dont *Sargassum liebmannii*, sur les plants de tomates (*Solanum lycopersicum*). Les résultats sont beaucoup moins concluants : les extraits de *S. liebmannii* retardent et inhibent la germination des graines, mais favorisent l'expansion des racines. D'autres macroalgues testées ont de bien meilleurs résultats comme *Ulva lactula* et *Padina gymnospora* qui sont ici les meilleurs candidats pour la création de biostimulants. Les sargasses peuvent être aussi utilisées afin d'améliorer la croissance des plantes dunaires (Williams & Feagin, 2010). Les expérimentations en serre ont montré que l'épandage de sargasses avait un impact positif sur la croissance de ces plantes. Il favoriserait ainsi à long terme l'intégrité des systèmes dunaires en utilisant au plus près les algues déposées sur la plage. Finalement, les sargasses peuvent être utilisées comme cosubstrat pour la fabrication de compost. Elles produisent dans ces conditions un compost de qualité égale ou supérieure aux normes de compostage actuelles. Les industries de compostage et de gestion des déchets peuvent donc utiliser les sargasses comme matière première pour créer un compost utilisé dans les industries horticoles et agricoles (Sembera *et al.*, 2018).

Le genre *Sargassum* contient aussi de nombreux composés qui peuvent être utiles pour le secteur pharmaceutique. De nombreuses molécules issues des sargasses détiennent des propriétés antiinflammatoires pour lutter contre les inflammations chroniques et aiguës et le potentiel des espèces tropicales de ce genre n'est pas entièrement exploré (Saraswati *et al.*, 2019). Parmi les composés bioactifs présents dans ces algues, la fucoxanthine est une molécule très intéressante faisant l'objet de travaux médicaux. Elle serait un atout majeur dans la lutte contre l'obésité puisqu'elle favorise la perte de poids chez les souris et posséderait aussi des propriétés antidiabétiques (Maeda *et al.*, 2008). Elle constitue de même une molécule prometteuse dans la lutte contre le cancer du côlon, car elle inhibe la prolifération des cellules cancéreuses (Das *et al.*, 2005). Les extraits de *S. natans* semblent également détenir des effets hépatoprotecteurs (*in vivo*) dans des modèles de lésions hépatiques aiguës et chroniques (Quintal-Novelo *et al.*, 2018) et

possèdent des fucoïdanes, un groupe de molécules ayant un effet protecteur face au stress oxydatif de certaines cellules. (Chale-Dzul *et al.*, 2017)

Enfin, la dernière opportunité de valorisation concerne le secteur de l'énergie. Depuis plus de 40 ans, la recherche s'intéresse à l'utilisation des macroalgues pour la production d'énergie et de biogaz puisqu'elles constituent une ressource renouvelable (Flowers et Bird, 1984). En effet, si la ressource est bien gérée, elle permettrait d'être moins dépendant des énergies fossiles et ne demande pas de terres agricoles fertiles contrairement aux cultures énergétiques (Kerrison, 2017; Notoya, 2010). C'est dans cette optique qu'en 1989, Anjaneyulu *et al.* se sont intéressés à la cinétique de la dégradation anaérobie de *Sargassum* et la production de biogaz associé. Toutefois, à cette époque *Sargassum fluitans* ne semblait pas être une bonne matière première et Bird *et al.* (1990) n'obtiennent dans leur expérimentation que 27 % du rendement théorique. L'hypothèse posée alors est que *S. fluitans* semble contenir une forte proportion d'un composant insoluble difficilement extractible pour la dégradation par des microorganismes.

Depuis de nouvelles tentatives de valorisation des sargasses ont été menées pour les transformer en une forme utilisable d'énergie comme le bioéthanol, le biogaz, et d'autres biocombustibles. La première de ces formes de stockage de l'énergie est l'éthanol obtenu grâce à la dégradation et la fermentation des sucres présents dans les sargasses. Offei *et al.* (2019) ont obtenu un rendement de 3,7 g d'éthanol pour 100 g de matière sèche de *Sargassum vulgare* et mis en valeur les résidus obtenus pour générer de l'électricité dans des piles microbiennes à hauteur de 0,50 W.m<sup>-3</sup>. D'autres chercheurs se sont aussi intéressés à la question et à la mise en place de prétraitement afin de maximiser les rendements de transformation (Borines *et al.*, 2013; del Río *et al.*, 2019; Jeetah *et al.*, 2016; Widyaningrum *et al.*, 2016). Une autre voie de valorisation énergétique des sargasses est la valorisation par la méthanisation sur laquelle de nombreuses recherches se focalisent (cf. section 3.6). Thompson, *et al.* (2020) se sont d'ailleurs intéressés à cette solution comme moyen de valorisation des afflux de sargasses sur l'île de la Barbade dans les Caraïbes. Les auteurs concluent que l'utilisation des sargasses comme source de biomasse pour la production de biogaz aurait des avantages majeurs pour l'économie en général et permettrait de restaurer l'esthétique naturelle des plages. Cependant, les sargasses ne sont pas de bonnes matières premières pour la monodigestion (digestion d'un seul substrat), mais pourraient être utilisées pour de la codigestion

(digestion de plusieurs substrats). D'autres chercheurs se sont intéressés au potentiel méthanogène du genre *Sargassum*. Pour donner quelques exemples, Marquez *et al.*, (2014) se sont penchés sur plusieurs genres dont *Sargassum* pour la production de biogaz dans les Philippines et les recherches de Milledge & Harvey (2016b) avaient pour objets la production de biogaz à partir de *Sargassum muticum* et l'ensilage comme méthode de stockage. Oliveira *et al.* (2015) ont également examiné l'optimisation des rendements grâce à la codigestion des sargasses avec de l'huile usée de friture et du glycérol. Ces derniers ont obtenu des résultats prometteurs puisque la cogestion permet d'augmenter les rendements de 56 % pour le glycérol et 46 % pour l'huile usée de friture.

Si les sargasses ont de nombreuses utilisations potentielles, les prochains chapitres vont se concentrer sur une seule : la production de biogaz grâce au processus de méthanisation.



## **Chapitre 3**

### **La valorisation par la méthanisation**

La méthanisation est la transformation de la matière organique en méthane et en gaz carbonique par des microorganismes fonctionnant en anaérobie. Cet ensemble de réactions est favorisé dans les milieux privés d'oxygène comme les environnements marécageux, les tourbières, les rizières ou bien même dans les systèmes digestifs de certains animaux comme les ruminants (Moletta, 2011). Ce processus est exploité par les sociétés humaines dans des milieux contrôlés pour le traitement des déchets agricoles, industriels et ménagers ainsi que pour les boues urbaines (ADEME, 2015). La méthanisation des déchets organiques permet alors une valorisation de la matière organique, une diminution des déchets à traiter dans les autres filières et une diminution des gaz à effet de serre en remplaçant l'utilisation d'énergie fossile.

#### **3.1. Paramètres influençant la digestion**

La méthanisation est un processus réalisé dans un environnement hermétique, le digesteur ou réacteur, dans lequel de nombreux paramètres, tels que la température, le pH, les intrants utilisés ou l'humidité vont influencer la digestion.

La température est un paramètre déterminant dans la méthanisation puisqu'elle influence l'activité enzymatique et la croissance des microorganismes. Dans le cadre de processus industriel, il est capital de maintenir la température du digesteur dans l'une des deux plages de températures suivantes. La première plage est comprise entre 35 et 40 °C, il s'agit alors de méthanisation mésophile. Celle-ci dispose d'une biologie plus stable et plus facile à maîtriser ce qui pourrait expliquer sa plus grande utilisation (ADEME, 2015). Elle s'oppose à la méthanisation thermophile qui s'échelonne sur des températures plus élevées comprises généralement entre 50 et 65 °C. Sa biologie est plus difficile à maîtriser et présente un plus fort risque d'inhibition à l'ammonium, mais elle élimine mieux les pathogènes. La méthanisation thermophile dispose également d'une meilleure dégradation des chaînes carbonées et d'un temps de séjour en digesteur réduit.

Le second paramètre important dans la méthanisation de la matière organique est le pH (Bernet & Buffière, 2011). Comme la température, il influence l'activité et la croissance des microorganismes et par conséquent l'activité enzymatique. Il doit rester stable tout au long du processus. Si le pH varie au cours du temps, il souligne alors une modification des équilibres chimiques entre les acides et les bases faibles ce qui peut inhiber la méthanisation. En effet, les microorganismes méthanogènes sont sensibles aux variations du pH, il est donc important de suivre ce paramètre, voire de l'ajuster pour le maintenir stable entre 6,5 et 8,5.

Les nutriments disponibles constituent le troisième paramètre influant la digestion anaérobie (Bernet & Buffière, 2011). La méthanisation est dépendante des microorganismes réalisant la dégradation de la matière organique. En plus du carbone, les microorganismes ont besoin pour se développer de macroéléments comme l'azote et le phosphore et de microéléments tels que le fer, le cobalt, le nickel ou le zinc. L'azote est l'élément le plus important dans la digestion et sa présence est souvent mise en relation avec le carbone au travers du ratio C : N. Pour maintenir des conditions idéales, ce ratio doit se situer entre les valeurs de 20 et 30, avec un optimum de 25 (Ricard et al., 2010). Cette quantité d'azote est déterminante puisque si l'élément est présent en quantité trop importante, il pourra provoquer la formation d'ammoniac et d'ammonium, composés inhibiteurs de la méthanisation, mais sa trop faible présence est un frein à la croissance des microorganismes.

La siccité est une autre variable intervenant dans la digestion de la matière organique. Elle correspond au pourcentage massique de matière sèche dans le mélange présent dans le réacteur (ADEME, 2015). En méthanisation, deux voies sont possibles. Tout d'abord, la voie humique dont la teneur en matière sèche est inférieure à 15 % va permettre de traiter les boues, les lisiers ou même des matières solides diluées. La voie humide présente l'avantage d'avoir un substrat homogène qui permet d'optimiser les transferts de matière et de chaleur et d'améliorer la production de biogaz. Les réacteurs doivent cependant pouvoir digérer de gros volumes en raison de la dilution et produisent beaucoup de lixiviat, le « jus » issu de la digestion. De l'autre côté, la méthanisation par voie sèche, 15 % à 40 % de matière sèche, permet la digestion de la biomasse solide. Elle répond aux inconvénients de la première, la taille du réacteur et le flux de matière sont réduits, mais le substrat est moins homogène ce qui limite les transferts de chaleur et de matière réduisant la production de biogaz.

Outre les paramètres abiotiques, les prétraitements de la matière organique constituent le dernier paramètre important dans le processus de méthanisation pouvant modifier considérablement la production de biogaz.

### 3.2. Les prétraitements

Les différents prétraitements sont combinables et mis en place en amont de la méthanisation puisqu'ils ont pour objectif de faciliter la dégradation des macromolécules en monomères. Les prétraitements semblent très importants dans le cas de la méthanisation des macroalgues brunes puisqu'elles contiennent de l'alginate, un glucide représentant entre 10 et 40 % du poids sec de l'algue, mais qui actuellement n'est pas assimilable par les microorganismes industriels (Davis *et al.*, 2003; Thompson *et al.*, 2019). Le rôle des prétraitements est donc de permettre la dégradation des molécules comme l'alginate. Ils se répartissent en fonction de leur mode d'action soit en : prétraitements physiques, biologiques, chimiques et thermiques.

Les prétraitements physiques regroupent les prétraitements mécaniques, par microondes et par ultrasons (Tableau 3.1). Les premiers utilisent des lames, des marteaux et des broyeurs pour fragmenter, broyer et déchiqueter la biomasse afin de former de plus petites particules pour la méthanisation. L'objectif est d'augmenter le rapport surface/volume des particules et de libérer des sucres complexes pour réduire le temps nécessaire à l'hydrolyse (Thompson *et al.*, 2019). Ils sont une option populaire dans le prétraitement des algues puisqu'ils peuvent considérablement augmenter le potentiel méthanogène expérimental. Tedesco *et al.* (2014) ont ainsi montré que battre *Laminariaceae ssp.*, une famille d'algues brunes, pendant 10 minutes à 50 °C avait permis d'augmenter de 53 % la production de biogaz. De leur côté, les prétraitements aux microondes et aux ultrasons visent à induire la lyse de la cellule et le déversement de son contenu par la création de chaleur et de pression liées à la polarisation des macromolécules et la rupture des liaisons hydrogène ou par la création et la destruction de microbulles de cavitation. Ces mêmes auteurs soulignent que ces méthodes sont utilisées comme prétraitements pour de nombreux types de biomasses, mais ne sont pas à ce jour utilisées sur les macroalgues telles que *Sargassum sp.*

Les prétraitements biologiques utilisent des microorganismes comme des champignons, des bactéries ou même des enzymes (Tableau 3.1). Ils préparent la biomasse à la méthanisation en dégradant la lignine et l'hémicellulose et facilitent ainsi l'hydrolyse et la méthanisation de la biomasse (Sindhu *et al.* 2016). Ils sont particulièrement efficaces sur certaines biomasses comme le chaume de bambou, les tiges de maïs ou la paille, mais leurs utilisations sur les algues brunes sont encore peu étudiées et ne semblent pas favorables (Thompson *et al.*, 2019).

Les prétraitements chimiques constituent la troisième catégorie de prétraitements existants (Tableau 3.1). Ils solubilisent les macromolécules pour faciliter la digestion par les microorganismes. Les réactifs alcalins et acides sont utilisés pour dégrader la lignine et l'hémicellulose et augmentent la concentration de sucres disponibles pour la méthanisation. Cependant, l'utilisation de ces réactifs chimiques produit des acides organiques toxiques qui contaminent les produits en aval et modifient le pH du réacteur, ce qui peut inhiber la méthanogenèse (Thompson *et al.*, 2019). Il est donc nécessaire de neutraliser la biomasse traitée avant la digestion pour maintenir des conditions idéales de méthanisation.

Enfin, il existe les prétraitements thermiques (Tableau 3.1). Ceux-ci comme les deux types de prétraitements précédents ont pour finalité la dégradation de la lignine et de l'hémicellulose (Rodriguez *et al.*, 2015; Thompson *et al.*, 2019). La biomasse est disposée avec de l'eau dans des autoclaves ou des réacteurs à doubles enveloppes puis chauffée de 50 à 250 °C afin de fragiliser les liaisons hydrogène et briser les parois des cellules végétales. L'avantage de cette méthode réside dans sa capacité à augmenter la production de méthane, mais surtout à éliminer les pathogènes potentiellement présents grâce aux températures élevées. Costa *et al.* (2015) ont ainsi obtenu des résultats intéressants lors de la méthanisation de macroalgues. L'autoclave de *Sargassum sp.* à 121 °C sous 1 bar de pression pendant 15 minutes a permis de multiplier par dix la concentration en acides gras volatils et d'augmenter le potentiel méthanogène de 60 %.

**Tableau 3.1 : Récapitulatif des différents prétraitements existants.**

Physique	Biologique	Chimique	Thermique
Battage, broyage, ultrasons, microondes.	Bactéries, champignons, enzymes.	Réactifs alcalins ou acides.	Autoclave, vapeur d'eau, etc.

### 3.3. Processus de méthanisation

La méthanisation est un ensemble de réactions biochimiques composé de 4 grandes étapes permettant de dégrader les macromolécules en molécules plus simples comme le méthane ( $\text{CH}_4$ ) ou le dioxyde de carbone ( $\text{CO}_2$ ) (Godon, 2011). Ces étapes sont l'hydrolyse, l'acidogénèse, l'acétogénèse et la méthanogénèse (Figure 3.1.).

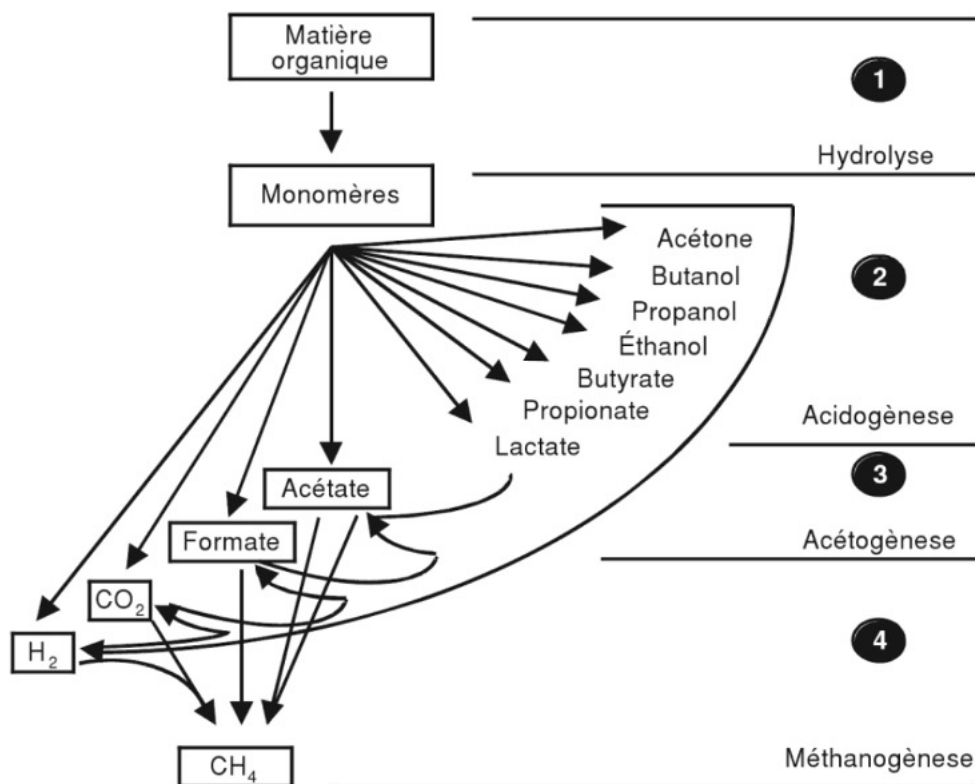
Durant l'hydrolyse, les microorganismes dégradent les macromolécules comme les polysaccharides, les lipides, les protéines et les acides nucléiques en leurs monomères respectifs : monosaccharides, acides gras, acides aminés et bases azotées. Cette dégradation est réalisée par des enzymes extracellulaires excrétées par de très nombreuses bactéries fonctionnant en anaérobiose stricte ou facultative et aussi impliquées dans l'acidogénèse. En raison de la vitesse faible de cette étape, elle est souvent considérée comme l'étape limitante de la méthanisation.

L'acidogénèse est la seconde grande étape de la méthanisation (Brodeur *et al.*, 2008; Godon, 2011). Elle consiste en la transformation des monomères issus de l'hydrolyse en acides gras volatils, comme les acides propioniques, acétiques ou butyriques, en alcool comme l'éthanol, en acides organiques ainsi qu'en hydrogène et en  $\text{CO}_2$ . C'est l'étape la plus rapide du processus de méthanisation, elle peut être 30 à 40 fois plus rapide que l'étape d'hydrolyse. Cette caractéristique peut devenir problématique puisque l'accumulation de l'hydrogène a une action inhibitrice sur les microorganismes responsables de la troisième étape.

L'acétogénèse est l'étape de transformation des acides gras volatils, des alcools et des acides organiques, en précurseurs du méthane : l'acétate, l'hydrogène et le dioxyde de carbone (Brodeur *et al.*, 2008; Godon, 2011). Elle dépend de plusieurs groupes de bactéries : les bactéries acétogènes productrices d'hydrogène, les bactéries homoacétogènes et les bactéries sulfatoréductrices. Les premières catalysent des réactions défavorables sur le plan thermodynamique c'est-à-dire des réactions ne se réalisant pas en conditions standards (concentration des réactifs = 1 M, pression des gaz = 1 atm). Elles nécessitent la consommation immédiate de l'hydrogène pour maintenir une pression partielle d' $\text{H}_2$  très faible pour conserver des conditions favorables à la formation d'acétate. Les secondes forment aussi de l'acétate, mais utilisent de l'hydrogène permettant ainsi de maintenir

la pression partielle en hydrogène faible. Les bactéries sulfatoréductrices sont des dégradeurs terminaux de la matière organique, au même titre que les microorganismes méthanogènes, mais elles utilisent le sulfate comme accepteur terminal d'électrons pour former du sulfure d'hydrogène. La formation de ce composé peut devenir problématique puisqu'il peut avoir des effets néfastes sur les organismes méthanogènes, mais aussi se retrouver dans le biogaz. En effet, le  $H_2S$  inhibe la croissance des microorganismes de manière directe ou en précipitant les métaux essentiels à leur croissance.

Enfin, la méthanogenèse est la dernière grande étape du processus de méthanisation. Elle est réalisée par certains microorganismes unicellulaires procaryote, des *Archaea* vivants dans des conditions strictes anaérobies. Comme lors de l'acétogénèse, deux groupes de microorganismes réalisent cette étape de la méthanisation. Les archées méthanogènes hydrogénotrophes utilisent le dioxyde de carbone et l'hydrogène libérés lors des phases précédentes pour former le méthane. Le second groupe correspond aux archées méthanogènes acétotrophes qui forment le méthane à partir de l'acétate et de l'hydrogène, mais aussi d'autres composés comme le formate, le méthanol et les méthylamines. Ce groupe de microorganismes est le plus productif puisqu'il est à l'origine de 70 % du méthane produit (Brodeur *et al.*, 2008; Godon, 2008). Par leur position en fin de chaîne trophique, les microorganismes méthanogènes sont entièrement dépendants des communautés microbiennes en amont dans le processus.



**Figure 3.1 : Les grandes étapes de la dégradation de la matière organique grâce au processus de méthanisation.** Source : Moletta (2011).

### 3.4. Produits de la méthanisation

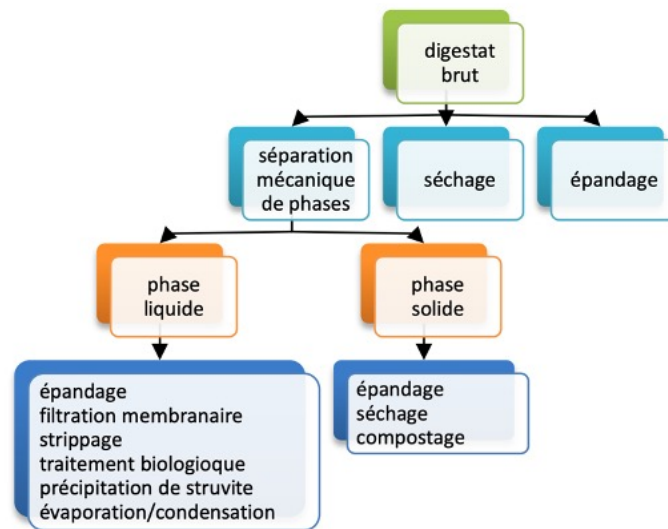
La dégradation de la matière organique au cours de la méthanisation est à l'origine de deux produits finaux : le biogaz, constitué principalement de méthane, ainsi que le digestat formé des résidus du processus.

Le biogaz est un mélange gazeux composé principalement de méthane et de dioxyde de carbone dont les proportions varient généralement de 50 à 70 % et de 20 à 50 % respectivement (ADEME, 2015). Il est saturé en vapeur d'eau et contient d'autres gaz en plus faible quantité comme le sulfure d'hydrogène et l'ammoniac qui doivent être éliminés par filtration à la sortie du digesteur. L'intérêt de ce produit réside dans sa valorisation sous plusieurs formes d'énergie. Il peut être utilisé pour la production de chaleur à l'échelle locale, mais aussi pour la production d'électricité. Cependant, l'efficacité énergétique de la transformation est faible et se limite à 33 %. Un mode de valorisation

plus courant consiste en la production combinée d'électricité et de chaleur. L'électricité est produite grâce à un moteur, et la chaleur est récupérée au travers du système de refroidissement. Il faut cependant des débouchés pour cette chaleur (ADEME, 2015; Ricard *et al.*, 2010). Dans le contexte de la péninsule du Yucatan, la chaleur n'a pas beaucoup de débouchés en raison de son climat tropical, la génération de chaleur et la cogénération ne sont donc pas intéressantes d'un point de vue financier. Ensuite, le biogaz peut être utilisé comme carburant pour les véhicules après une série d'étapes d'épuration et de compression (ADEME, 2015). Cette valorisation a été mise en place en dans différents pays d'Europe comme l'Allemagne, la Suisse et la Suède, mais aussi en France dans la ville de Lille où une flotte d'autobus fonctionne au méthane. Enfin, la dernière utilisation possible consiste en l'injection du biogaz dans le réseau de gaz naturel. Cela implique évidemment le traitement du gaz à sa sortie du réacteur pour éliminer les gaz contaminants du biogaz et répondre aux critères nécessaires à sa commercialisation. Il constitue le modèle de valorisation le plus performant.

Le second produit de la méthanisation est le digestat. Il consiste en un mélange pâteux et riche en matière organique et en nutriments assimilables biologiquement (ADEME, 2015 ; Ricard *et al.*, 2010). Selon sa qualité, il est possible de l'utiliser comme amendement agricole après une phase de traitement visant à éliminer les contaminants comme les métaux lourds. Cette qualité va dépendre notamment de la source de biomasse utilisée. Il est donc de l'intérêt des exploitants de connaître et d'homogénéiser les intrants (Figure 3.2). Le traitement le plus répandu consiste en la séparation des phases solide et liquide qui possèdent des caractéristiques différentes. La fraction solide a une teneur élevée en phosphore et en matière organique, elle peut alors être utilisée comme amendements dans les champs. La phase liquide, elle, contient peu de matière organique, en revanche elle dispose d'une concentration importante en azote ammoniacal. Elle peut donc être utilisée comme fertilisant en agriculture. La différenciation de ces deux phases permet ainsi de mieux gérer dans le temps les apports en azote et phosphore et constitue une meilleure gestion agronomique.





**Figure 3.2 : Possibilités de traitement du digestat pour sa valorisation** Source : ADEME (2015)

### 3.5. Bénéfices de la méthanisation pour les écosystèmes

La valorisation des sargasses échouées sur les côtes de la péninsule du Yucatan a pour objectif de financer leur ramassage et ainsi limiter leurs impacts sur la population et sur les écosystèmes. La présence de ces algues et leur décomposition dans les eaux littorales et sur les plages sont à l'origine de nombreux problèmes écologiques présentés en section 2.3.2. Leur retrait permettrait de minimiser les impacts sur l'ensemble des écosystèmes côtiers touchés. Cela limiterait les influx supplémentaires de phosphore et azote qui eutrophisent les eaux littorales et provoquent des changements dans la composition des prairies marines ainsi que dans les chaînes trophiques des organismes dépendant de ces écosystèmes (Cabanillas-Teran *et al.*, 2019; van Tussenbroek *et al.*, 2017). Le ramassage des sargasses serait aussi bénéfique pour de nombreux animaux qui meurent en raison des effets combinés des conditions anoxiques et des concentrations élevées en ammonium et en sulfure d'hydrogène issues de la dégradation des algues (Rodríguez-Martínez *et al.*, 2019). Il supprimerait aussi la barrière physique créée par l'accumulation des algues qui empêche les tortues marines de se rendre sur les plages pour pondre (Burrowes *et al.*, 2019).

En plus de la réduction des impacts de l'échouage et de la décomposition des sargasses, la valorisation des échouages permettrait de générer des revenus disponibles pour former du personnel. Il permettrait d'élaborer un protocole strict de ramassage permettant de limiter l'érosion des berges associé à la récolte collatérale du sable ou la destruction des nids de tortues par le passage de la machinerie lourde. Les recettes générées par la vente du biogaz permettraient d'investir dans la recherche et le développement des procédés de transformation des algues en biogaz. En effet, seulement une petite quantité des sargasses échouées sur les plages est réellement récoltée. En 2019, le Mexique aurait reçu près d'un demi-million de tonnes d'algues sur les côtes du Quintana Roo, mais seulement 83 507 tonnes auraient été récoltées, soit 17 % (Ortega et al., 2019; SEMAR, 2019a). Enfin, les revenus permettraient aussi le développement de nouvelles technologies et possibilités de valorisation.

Dans le contexte de changements climatiques, la valorisation des sargasses constituerait un moyen de limiter les émissions de gaz à effet de serre. Tout d'abord, la décomposition anaérobie des algues sur la plage libère du méthane, un puissant gaz à effet de serre. La valorisation de ces algues préviendrait ces émissions dans l'atmosphère et permettrait de remplacer une partie du gaz naturel utilisé par la population par du biogaz. Évidemment, une analyse du cycle de vie est nécessaire afin de s'assurer que le ramassage, la construction des usines et le transport sont moins néfastes que de laisser les algues sur les plages. La valorisation et l'utilisation du digestat issu de la méthanisation constitueraient une alternative locale à l'utilisation de fertilisants chimiques de synthèse. La production de ceux-ci demande de l'énergie apportée souvent par des énergies fossiles. Le remplacement d'une partie de ces engrais par des fertilisants et amendements issus des sargasses constituerait une économie d'énergie et de dioxyde de carbone.

### **3.6. Résultats obtenus avec différentes macroalgues**

Les macroalgues sont l'objet de nombreuses recherches pour diverses utilisations, dont la production d'énergie grâce à la méthanisation. L'intérêt des macroalgues réside dans leur exploitation qui ne nécessite aucune terre arable un avantage par rapport aux cultures énergétiques. Elles constituent aussi un potentiel énergétique remarquable avec l'équivalent de

plus de 100 exajoules<sup>2</sup> par an aux États-Unis, soit  $100 \times 10^{18}$  J, quand la biomasse terrestre représente 22 EJ.an<sup>-1</sup> et les déchets solides municipaux 1,5 EJ.an<sup>-1</sup> (Chynoweth *et al.*, 2001).

Les macroalgues sont une source de biomasse intéressante puisqu'elles ont le potentiel de devenir une culture énergétique aquatique économiquement viable (Milledge *et al.*, 2019a). Toutefois, les potentiels méthanogènes expérimentaux des macroalgues sont généralement compris entre 0,150 et 0,200 m<sup>3</sup> CH<sub>4</sub>.kg<sup>-1</sup> VS (Tableau 3.2), des valeurs bien en deçà des valeurs théoriques situées autour de 0,400 – 0,450 m<sup>3</sup> CH<sub>4</sub>.kg<sup>-1</sup> VS. Pour ce qui est des sargasses, les potentiels de *S. fluitans* et *S. natans* ont peu été étudiés contrairement à d'autres espèces comme *S. muticum*. Le genre *Sargassum* dispose d'un potentiel méthanogène expérimental faible quand il est comparé aux valeurs théoriques calculées (<50 %), mais le rendement obtenu est aussi faible par rapport aux autres macroalgues. Cette différence semble liée à la présence de composés récalcitrants comme les hydrocolloïdes complexes et certains phénols qui inhibent la dégradation des molécules complexes en molécules simples lors de la phase d'hydrolyse (Milledge *et al.*, 2019b). Cependant, il est possible d'augmenter ces rendements en effectuant un prétraitement (Costa *et al.*, 2015) ou en combinant les algues à un autre substrat (Oliveira *et al.*, 2015; Suhartini *et al.*, 2020). Ces nouveaux rendements sont alors beaucoup plus intéressants pour l'utilisation des sargasses comme source de biomasse.

---

<sup>2</sup> 1 EJ = 10<sup>18</sup> J. À titre indicatif, la consommation d'énergie primaire aux États-Unis est d'environ 94 EJ par an.

**Tableau 3.2 : Potentiels méthanogènes de certaines macroalgues.** Les biomasses terrestres ont été ajoutées à titre de comparaison.

Biomasse utilisée	Cosubstrat	Prétraitement	Classe de température	Potentiel méthanogène théorique (m <sup>3</sup> CH <sub>4</sub> .kg <sup>-1</sup> VS)	Potentiel méthanogène expérimental (m <sup>3</sup> CH <sub>4</sub> .kg <sup>-1</sup> VS)	Auteurs
<b><i>Biomasse terrestre</i></b>						
Pied de maïs	-	Broyage	Mésophile	0,455 - 0,470	0,241	Li <i>et al.</i> , 2013
Déchets de fruits et légumes	-			0,456 - 0,476	0,342	
Paille de riz	-			0,455-0,460	0,281	
Huile végétale usagée	-			1,014	0,811	
Fumiers	-	-	Mésophile	0,444 - 0,506	0,051 - 0,322	Suhartini <i>et al.</i> , 2020
Déchets alimentaires	-	Broyage		-	0,192	
Lie de tofu	-	-		-	0,230	

Biomasse utilisée	Cosubstrat	Prétraitement	Classe de température	Potentiel méthanogène théorique (m <sup>3</sup> CH <sub>4</sub> .kg <sup>-1</sup> VS)	Potentiel méthanogène expérimental (m <sup>3</sup> CH <sub>4</sub> .kg <sup>-1</sup> VS)	Auteurs
<b>Macroalgues</b>						
<i>Sargassum sp.</i>	-	-	Mésophile	0,45	0,18	Bird <i>et al.</i> , 1990
<i>Sargassum fluitans</i>	-	-	Mésophile	0,390 - 0,460	0,113	Milledge <i>et al.</i> , 2020
<i>Sargassum natans</i>	-	-		0,395 - 0,460	0,145	
<i>Sargassum muticum</i>	-	Hachage	Mésophile	-	0,060 - 0,110	Milledge & Harvey, 2016b
<i>Sargassum sp.</i>	-	Broyage + Autoclave + Fermentation sombre	Mésophile	-	0,541	Costa <i>et al.</i> , 2015
<i>Sargassum muticum</i>	-	Séchage + Broyage ou Hachage	-	-	0,166 - 0,208	Soto <i>et al.</i> , 2015
<i>Sargassum sp.</i>	-	Séchage + Broyage	Mésophile	-	0,181	Oliveira <i>et al.</i> , 2015
	Glycérol brut			-	0,157 - 0,283	
	Huile de friture usagée			-	0,172 - 0,265	

Biomasse utilisée	Cosubstrat	Prétraitement	Classe de température	Potentiel méthanogène théorique (m <sup>3</sup> CH <sub>4</sub> .kg <sup>-1</sup> VS)	Potentiel méthanogène expérimental (m <sup>3</sup> CH <sub>4</sub> .kg <sup>-1</sup> VS)	Auteurs
<i>Sargassum muticum</i>	-			-	0,130	
<i>Undaria pinnatifida</i>	-			-	0,242	
<i>Saccorhiza polyschides</i>	-			-	0,216	
<i>Saccharina latissima</i>	-			-	0,209	
<i>Himanthalia elongata</i>	-	Séchage et hachage grossier	Mésophile	-	0,202	Jard <i>et al.</i> , 2013
<i>Gracilaria verrucosa</i>	-			-	0,139	
<i>Palmaria palmata</i>	-			-	0,279	
<i>Codium tomentosum</i>	-			-	0,144	
<i>Ulva lactuca</i>	-			-	0,241	
<i>Ulva spp</i>	Déchets alimentaires et marc de café	Broyage	Mésophile	-	0,212 - 0,330	Kim <i>et al.</i> , 2019
<i>Ulva spp</i>	Bouse de vache (50 %)	Broyage	Mésophile	-	0,195	Akila <i>et al.</i> , 2019
	Bouse de vache (25 %)			-	0,574	

Biomasse utilisée	Cosubstrat	Prétraitement	Classe de température	Potentiel méthanogène théorique (m <sup>3</sup> CH <sub>4</sub> .kg <sup>-1</sup> VS)	Potentiel méthanogène expérimental (m <sup>3</sup> CH <sub>4</sub> .kg <sup>-1</sup> VS)	Auteurs
<i>Laminaria digitata</i>	-	Fermentation sombre	Mésophile	-	0,222	Ding <i>et al.</i> , 2020
	-	Autoclave + Fermentation sombre		-	0,282	
	-	Enzymolyze + Fermentation sombre		-	0,271	
	-	Autoclave + Enzymolyze + Fermentation sombre		-	0,294	
<i>Laminaria digitata</i>	-	Séchage + Hachage	Thermophile	0,411	0,308	Sun <i>et al.</i> , 2019
	Fumier de bovins (20 %)	Séchage + Hachage		0,390	0,290	
<i>Gracilaria sp.</i>	-	Broyage	Mésophile	-	0,060	Suhartini <i>et al.</i> , 2020
	Déchets alimentaires (50 %)			-	0,165	
	Lie de tofu (50 %)			-	0,112	

### 3.7. Obstacles liés à l'utilisation des sargasses comme source de biomasse

Malgré le potentiel énergétique que représentent les échouages de sargasses sur les côtes du Quintana Roo, plusieurs obstacles se dressent contre la valorisation de ces algues.

Le phénomène des échouages massifs de sargasses est un phénomène relativement nouveau et intermittent. Les algues se déposent généralement le long des plages de mai à octobre. La source de biomasse n'est donc pas disponible toute l'année et il est nécessaire de trouver un moyen efficace et économique de pouvoir la stocker sans perdre en rendement méthanogène. Les flux d'algues sont intermittents, mais aussi irréguliers en fonction des années. Les années 2014, 2015, 2018 et 2019 ont été des années d'afflux très importants (Figures 2.4 et 2.5). En revanche, les années 2016 et 2017 ont été bien moindres. Il est encore nécessaire de trouver un moyen de maintenir la rentabilité des réacteurs durant les temps de disettes notamment par de la codigestion.

La composition des algues peut aussi se révéler un obstacle lors de la méthanisation. En effet, la présence de certains composés phénoliques diminue la production de méthane. Le faible rendement méthanogène pourrait aussi être associé au ratio C : N qui doit être compris entre 20 : 1 et 30 : 1 pour des conditions de digestion idéales. Pour le genre *Sargassum*, cette valeur semble fluctuer selon les espèces et oscille entre 12 et 22 (Marquez *et al.*, 2014). Cependant, ce ratio C : N est variable et peut changer aussi en fonction du milieu de croissance et de récolte des algues. C'est particulièrement le cas pour les sargasses pélagiques, *S. fluitans* et *S. natans*, qui se déplacent avec les courants marins. Leur ratio C : N dans les eaux océaniques est bien supérieur à la plage d'optimum de la méthanisation puisqu'il est d'environ 47 : 1 alors que les algues récoltées dans la zone néritique ont un ratio C : N de 27 : 1 (Lapointe *et al.*, 2014). Considérer la codigestion, étudier les meilleurs prétraitements afin de parvenir à un ratio C : N optimal puis rapprocher les potentiels méthanogènes expérimental et théorique devient donc un travail important pour optimiser la valorisation des échouages.

Les sargasses, comme les macroalgues, contiennent généralement plus de soufre que les biomasses terrestres (Milledge & Harvey, 2018). Bien qu'il soit un élément essentiel à la croissance des microorganismes, l'excès de soufre abaisse le rendement de la méthanisation, car il favorise les



bactéries sulfatoréductrices. De plus, l'accumulation des sulfates qui inhibe l'activité des microorganismes. Enfin, la concentration élevée de soufre dans les sargasses peut être à l'origine d'une production importante de sulfure d'hydrogène dangereux pour l'homme et corrosif pour le réacteur (Thompson *et al.*, 2020). L'application de microaération pourrait cependant être une solution pour éliminer ce gaz dans le réacteur. Mahdy *et al.* (2020) ont ainsi pu réduire de 58 % la quantité de  $H_2S$  dans le biogaz à la sortie du réacteur en appliquant ce traitement durant le processus de digestion.

Enfin, les algues peuvent accumuler des métaux lourds au cours de leur croissance. L'accumulation de ces métaux peut alors poser problème pour le traitement et la valorisation du digestat. En effet, il est difficilement utilisable comme engrais en sortant du réacteur puisqu'il risque de contaminer le milieu d'application (Nkoa, 2014). Milledge *et al.* (2020) se sont intéressés à la concentration des métaux lourds dans les sargasses échouées (*S. fluitans* et *S. natans*) sur les îles Turques-et-Caïques dans les Caraïbes. Ils constatent que les métaux lourds et les métalloïdes ne présentent pas de niveaux inquiétants à l'exception de l'arsenic. Ces résultats sont aussi observés par Rodríguez-Martínez *et al.* (2020) qui obtiennent des concentrations élevées d'arsenic interdisant l'utilisation des sargasses comme fourrage pour le bétail selon les normes européennes. Ceci souligne la nécessité de réaliser régulièrement des tests afin de s'assurer de la concentration de ces éléments pour l'efficacité de la méthanisation et ultimement pour la qualité du digestat pour sa valorisation sous forme d'engrais.

Enfin, le dernier obstacle à l'utilisation des sargasses comme substrat pour la méthanisation est leur forte teneur en sel. Leur croissance dans l'océan en fait un substrat beaucoup plus riche sel que la biomasse terrestre. Or, à une concentration supérieure à  $10\text{ g.L}^{-1}$ , la pression osmotique augmente entraînant la diminution de l'activité des organismes. Par conséquent la production de méthane diminue (Thompson *et al.*, 2020). Dans le cas des sargasses, Zhang *et al.* (2017a) ont ainsi montré que le rendement en méthane obtenu avec une concentration en sodium de  $4,42\text{ g.L}^{-1}$  était 38 % supérieur au groupe témoin ( $[C] \sim 15\text{ g.L}^{-1}$ ). Certains inoculums semblent cependant présenter de bons rendements à des concentrations allant jusqu'à  $35\text{ g.L}^{-1}$  (Zhang *et al.*, 2017b). Cela permettrait la méthanisation des algues sans avoir besoin de réduire la concentration en sel.

## **Chapitre 4**

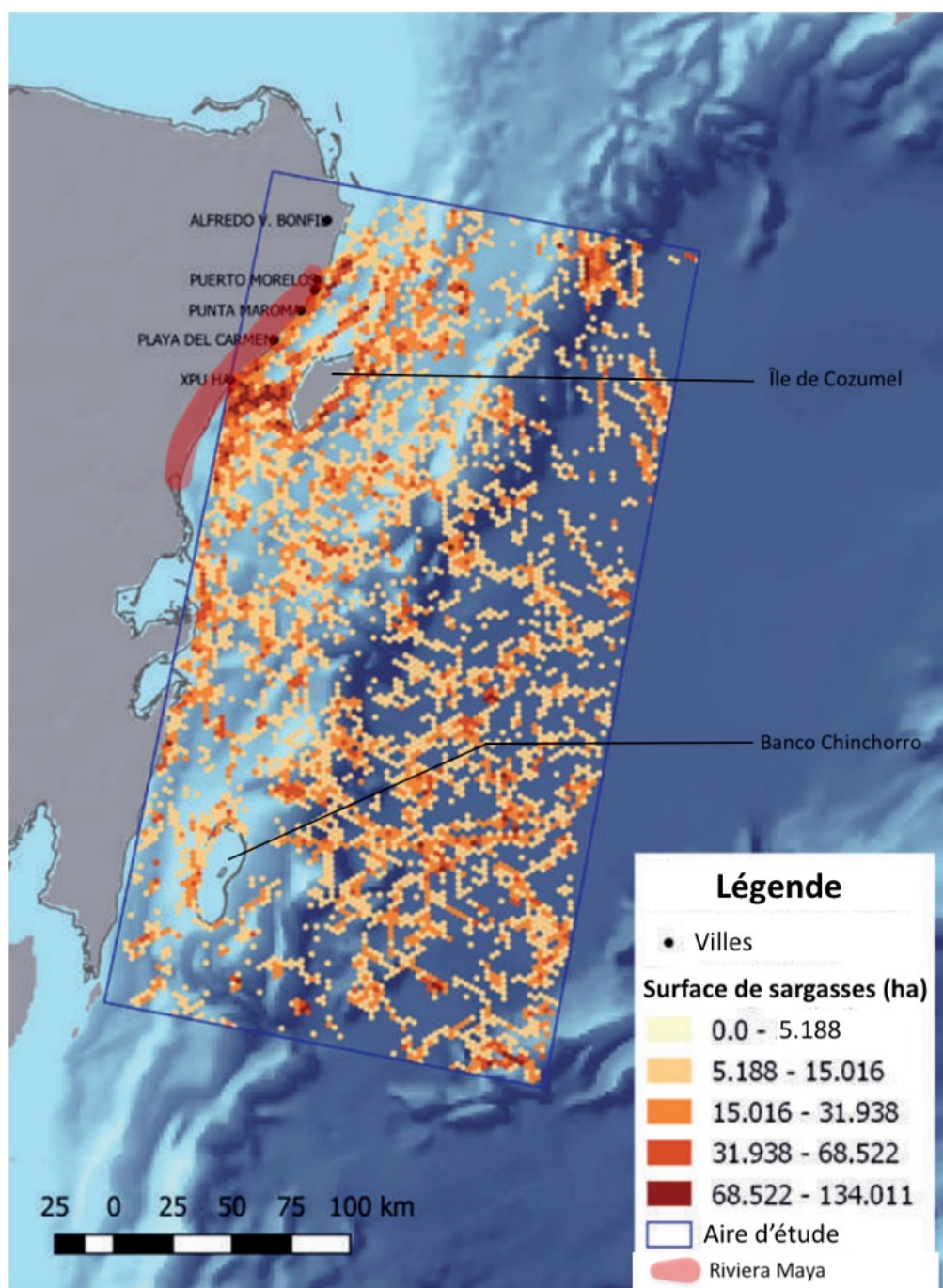
### **Gestion des flux**

La méthanisation est une des différentes possibilités intéressantes permettant de valoriser les sargasses. Leur potentiel méthanogène est très inférieur à sa valeur théorique, mais les prétraitements et la codigestion peuvent l'augmenter considérablement. Dans l'optique de l'implantation d'unités de méthanisation, il faut s'intéresser à l'une des principales barrières limitant leur valorisation : la gestion du flux intermittent des algues.

#### **4.1. Flux de sargasses entrant**

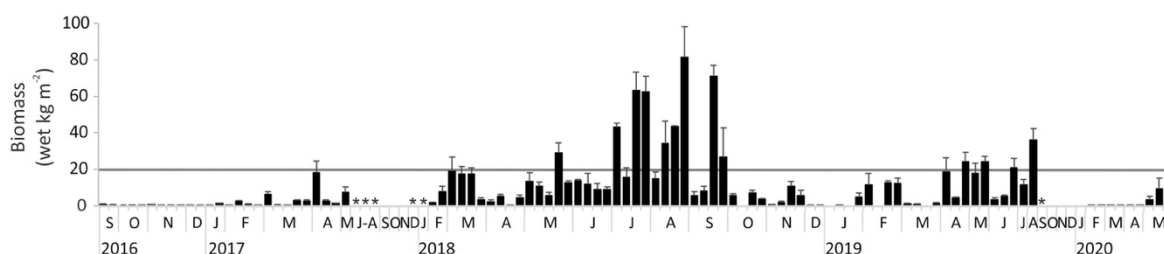
Dans le cadre de la valorisation des sargasses, il est nécessaire de quantifier le volume d'algues échouées ainsi que d'estimer leur répartition spatiale et temporelle afin de planifier la collecte.

Pour ce qui est de la dimension spatiale, les échouages massifs sont concentrés sur le littoral du canal de Cozumel, entre la Riviera Maya et l'île de Cozumel (Figure 4.1) (Arreola-Lizarraga *et al.*, 2020). Cette zone possède en effet des courants et des conditions océanographiques particulières (Carrillo *et al.*, 2017; Chávez *et al.*, 2003) supposées être responsables de l'accumulation dans la région. Le courant du Yucatan transporterait les algues le long des côtes du Quintana Roo et au travers du canal de Cozumel. Les vents d'est, dominants en été, ramèneraient les eaux superficielles et les sargasses vers le rivage (Rodríguez-Martínez *et al.*, 2020). Les algues entrant dans le canal de Cozumel auraient ainsi une forte probabilité de s'échouer sur les plages alors que celles passant à l'est poursuivraient leur mouvement vers le nord (Arreola-Lizarraga *et al.*, 2020). Des nappes de sargasses peuvent aussi être observées à environ 100 km des côtes. Dans la majorité des cas, elles continueront leur déplacement vers le nord, mais une partie pourra atteindre les côtes en raison des courants de surface.

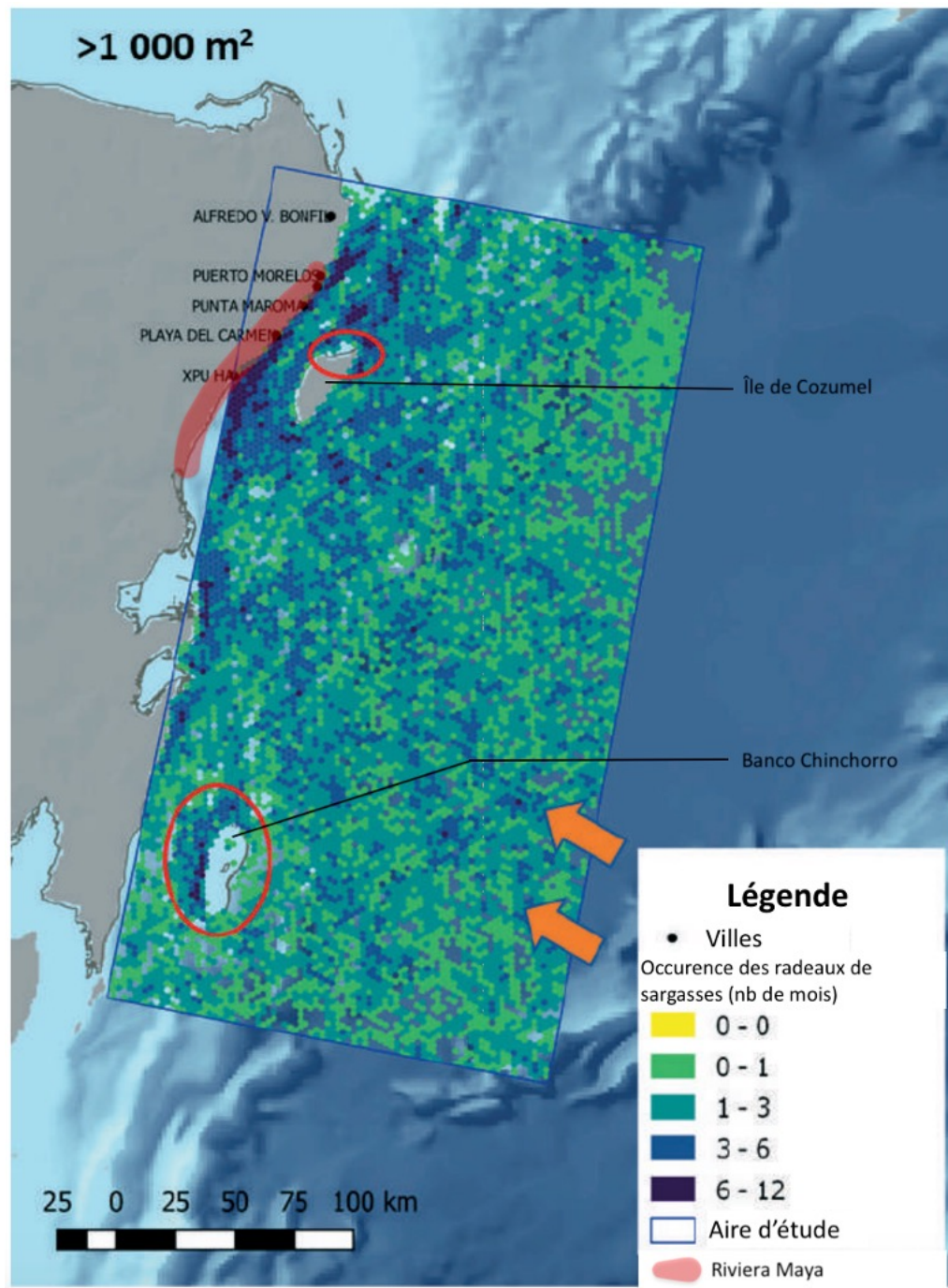


**Figure 4.1 : Distribution spatiale de la surface de sargasses cumulée sur la période janvier 2016 à mars 2019 dans Caraïbes mexicaines.** Les données sont dérivées de la détection à haute résolution spatiale avec des images Landsat 8 OLI. Chaque hexagone représente 25 km<sup>2</sup>.  
Modifié de : Arreola-Lizarraga *et al.* (2020)

García-Sánchez *et al.* (2020) se sont intéressés à la biomasse déposée sur une plage de Puerto Morelos sur la Riviera Maya. Ils ont récupéré une à deux fois par semaine sur des unités de 1 m<sup>2</sup> les sargasses fraîches déposées au cours des précédentes marées. Ils ont de cette façon estimé la biomasse déposée quotidiennement (Figure 4.2). Les années 2016 et 2017 ont été des années de très faible affluence contrairement à 2018. Sur l'entièreté de cette dernière, la biomasse quotidienne moyenne déposée était d'environ  $17,3 \pm 1,8 \text{ kg.m}^{-2}$  soit près de 5,6 - 7,0 t. m<sup>-2</sup> sur 365 jours. En considérant qu'un mètre carré est représentatif d'un mètre de côte sur la Riviera Maya, zone d'accumulation majeure, entre 728 000 et 910 000 tonnes de sargasses pourraient s'être échouées en 2018 sur les 130 km de la Riviera Maya. Cette estimation est impressionnante, mais elle correspond à l'année d'échouage la plus importante jamais enregistrée. Les volumes récoltés cette année ont été bien inférieurs à ces chiffres. En effet, le SEMARNAT (2018b) annoncé en aout 2018 en avoir récolté un total d'environ 100 000 tonnes depuis le début de l'année. L'année 2019 a été de bien moindre importance, mais près de 84 000 tonnes ont tout de même été récoltées sur les côtes de l'état (SEMAR, 2019a). Ces volumes récoltés sont suffisants pour fournir en biomasse plusieurs unités de méthanisation et restent une faible proportion des volumes de sargasses échoués. Un intérêt économique pourrait être amené à augmenter les volumes récoltés.



littoral du canal de Cozumel et la Riviera Maya (Figure 4.3) (Arreola-Lizarraga *et al.*, 2020). Sur la période de janvier 2016 à mars 2019 (39 mois), des radeaux de sargasses ont été présents durant 6 à 12 mois soit 15 à 30 % du temps. Ceci est d'autant plus important que les affluences de 2016 et 2017 ont été très faibles (Figure 4.2). La raison de cette différence entre les plages semble liée aux conditions océanographiques particulières à l'origine de l'accumulation des algues sur la Riviera Maya.



**Figure 4.3 : Distribution spatiale de la fréquence d'occurrence des nappes de sargasses dans Caraïbes mexicaines pour la période janvier 2016 à mars 2019.** Les données sont dérivées de la détection à haute résolution spatiale avec des images Landsat 8 OLI. Chaque hexagone représente 25 km<sup>2</sup>. Les cercles rouges montrent l'île de Cozumel (nord) et l'atoll de Banco Chinchorro (sud). Modifié de : Arreola-Lizarraga *et al.* (2020)

## **4.2. Méthodes de ramassage et leurs impacts**

La première étape nécessaire à la valorisation des sargasses consiste en leur ramassage sur les plages, dans les eaux côtières ou marines.

Chacune des méthodes présentées ci-dessous possède des rendements de collecte plus ou moins importants. Ceux-ci sont principalement dépendants de quatre facteurs : la capacité de stockage, l'effort de ramassage, le temps de transport aller-retour entre le lieu de récolte et le lieu de déchargement et la durée du déchargement. Chacun de ces paramètres peut rapidement faire augmenter ou diminuer la quantité de sargasses récoltées. Par exemple, une distance courte entre le point de collecte et de déchargement limite le temps de trajet et par conséquent augmente généralement le rendement. Il faut donc les prendre en compte dans la planification des opérations de récolte des algues. Un tableau comparatif des rendements ainsi que des avantages et inconvénients des différentes méthodes de récoltes est disponible dans l'annexe 1.

### **4.2.1. La collecte en rive**

La collecte en rive fut la première des actions menées par de nombreux pays, dont le Mexique, face aux premières années d'échouages exceptionnelles. Elle se différencie en ramassage manuel, s'appuyant sur la force humaine, et en ramassage mécanique basé sur l'utilisation de la machinerie lourde.

#### **a) Le ramassage manuel**

Le ramassage manuel est la première et la plus simple des méthodes de ramassage (Tableau 4.1). Elle consiste en la collecte des sargasses par des brigades spécialisées à l'aide d'un équipement peu coûteux, comme des fourches et des brouettes.

Cette méthode possède de nombreux avantages (SAFEGE, 2019a; Vos *et al.*, 2016). Tout d'abord, il s'agit d'une technique respectueuse de l'environnement. Le déplacement des employés présente

très peu de risque de tassement du sable ou de destruction de nids de tortue ou des oiseaux limicoles présents sur les sites d'interventions. Elle permet aussi de laisser sur place une faible quantité de sargasses qui a un rôle positif sur le littoral. Elle présente un faible taux de collecte de sable (inférieur à 1 %) ce qui réduit l'érosion des plages dans un contexte de ramassage régulier pour fins de valorisation. Les brigades spécialisées dans la récolte des algues peuvent aussi se déplacer facilement et parvenir aux plages non accessibles à la machinerie lourde utilisée pour le ramassage mécanique. Leur mobilité est toutefois réduite puisque les brigades ne peuvent se déplacer bien loin des bennes de collecte. Ces brigades peuvent aussi réaliser un tri entre les sargasses et les macrodéchets apportés par la mer et ainsi limiter le besoin d'un tri à l'entrée du digesteur. Ces équipes sont aussi très polyvalentes et s'adaptent très bien aux échouages frais ou plus anciens, de faible à grande ampleur.

Toutefois, le rendement est faible, l'organisme SAFEGE l'a évalué entre 22 et 32 m<sup>3</sup>/h en Martinique pour une équipe de 12 personnes. Il est bien donc bien inférieur aux rendements du ramassage mécanique qui varient entre 30 et 200 m<sup>3</sup>/h. Ce rendement faible par personne induit le besoin d'un effectif humain très important pour nettoyer les plages. Les brigades formées sont exposées à une forte pénibilité du travail relié aux efforts physiques, mais aussi à la chaleur et aux émanations de sulfure d'hydrogène. Chaque personne doit donc posséder un détecteur de H<sub>2</sub>S afin d'assurer sa sécurité et d'effectuer un suivi de l'exposition. Enfin, l'intervention de la machinerie lourde est obligatoire afin de charger les camions-bennes et d'évacuer les algues.

**Tableau 4.1 : Récapitulatif des avantages et inconvénients de la collecte manuelle.**

<b>Avantages</b>	<b>Inconvénients</b>
Préservation des nids de tortues	Rendement faible
Faible érosion des plages	Besoin élevé en main d'œuvre
Accès facilité aux plages	Risques sanitaires forts
Tri des déchets	Forte pénibilité du travail
Polyvalence	Nécessité de machinerie lourde afin d'évacuer les algues des plages
Faible coût des équipements	Mobilité limitée

Source : SAFEGE (2019a) et Vos *et al.* (2016)



## **b) Le ramassage mécanique**

Les méthodes de récolte mécanique s'appuient sur les rendements et la puissance de la machinerie lourde pour collecter les sargasses. Elle peut être menée par une variété de machines spécialisées, ou non, dans le ramassage des algues sur les plages. Les différents engins utilisés possèdent de nombreux avantages et inconvénients en commun qui découlent généralement de la taille et du poids de ces machines (Chereau, 2019; Vos *et al.*, 2016). Bien qu'ils dépendent des types d'échouages et des conditions de récolte, les rendements sont plus élevés que ceux de la récolte manuelle ou ceux des barges de collecte utilisées dans les eaux côtières. Les effectifs nécessaires pour réaliser le nettoyage des plages sont aussi réduits et le travail réalisé présente une plus faible pénibilité que la collecte manuelle. À l'exception du Cane loader, les différents véhicules offrent un poste de pilotage surélevé et climatisé qui protège les conducteurs de la chaleur et du sulfure d'hydrogène. L'évacuation des algues est aussi facilitée puisque la machinerie utilisée peut directement charger un camion-benne. Cependant, le coût d'acquisition de cette machinerie reste élevé. Le poids de véhicules utilisés peut provoquer leur ensablement si les plages possèdent une faible portance. L'accès aux sites de collecte peut aussi être limité par la taille des véhicules qui les empêche de circuler sur des plages trop étroites ou non accessibles depuis la route. La manipulation de ces machines nécessite aussi la formation des conducteurs pour récolter efficacement les sargasses et éviter les dommages aux plages ou les bris de matériels. Comme pour l'ensemble des collectes mécaniques, il n'est pas possible de séparer les sargasses et les macrodéchets tels les plastiques en amont. Dans le contexte de la valorisation des algues, ceci constitue un inconvénient important, car il implique un tri obligatoire avant le stockage ou l'entrée dans le digesteur. Enfin, la collecte des sargasses est réalisée dans un environnement difficile pour les équipements qui entrent en contact avec de l'eau, du sel, du sable et du sulfure d'hydrogène. Leur entretien régulier est alors primordial pour les conserver dans un bon état et assurer leur longévité.

Du point de vue environnemental, la collecte mécanique en rive peut être néfaste. L'utilisation de la machinerie lourde compacte le sable et provoque des ornières. Elle présente des risques importants de destructions des nids de tortues et d'oiseaux limicoles par écrasement. Si la machinerie n'est pas spécialisée, elle peut aussi accélérer très fortement l'érosion, car près de 60 % du volume récolté par les machines peut être constitué de sable (Rodríguez-Martínez *et al.*, 2016).

Atkins *et al.* (1993) ont ainsi pu observer que la récolte systématique des algues échouées pouvait provoquer une réduction de la plage de 10 à 12 m en seulement 17 ans. Bien que la séparation des algues et du sable ainsi que la redistribution de ce dernier sur les plages soient possibles, elle engendre un coût supplémentaire. Il est donc dans l'intérêt de l'exploitant de limiter le taux de récolte de sable.

Dans un contexte de valorisation, le rendement important et un effectif réduit sont des avantages certains même si son coût est important. Cependant, la collecte de sable et de déchets avec les sargasses va devoir nécessiter des tris et des lavages en aval afin de pouvoir disposer d'une biomasse prête pour la digestion. En plus de ces points communs, chaque véhicule possède aussi ses forces et faiblesses particulières.

#### **i. Les pelles mécaniques hydrauliques**



**Figure 4.4 : Photographie d'une pelle mécanique hydraulique utilisée pour le ramassage des sargasses.** Source : Chereau (2019)

Les pelles mécaniques ont été les premiers véhicules utilisés dans la collecte mécanique des sargasses. Habituellement utilisées dans la construction et dans les travaux publics, les pelles mécaniques existent dans toutes les tailles et peuvent être équipées de godet de toutes formes. Dans le cas de la collecte des sargasses (Figure 4.3, Tableau 4.2), le rendement des pelles mécaniques hydrauliques oscille entre 100 et 200 m<sup>3</sup>/h dépendamment des conditions, de la taille du godet et du ballet des camions (Chereau, 2019). Toutefois, le taux de collecte de sable peut

correspondre de 20 à 40 % du volume récolté. La problématique de la collecte de sable se répercute aussi en aval puisqu'il est nécessaire de nettoyer les algues de leur sable avant leur valorisation. Le réel avantage de cette méthode réside au niveau des travailleurs puisque la pénibilité du travail ainsi que les risques sanitaires sont faibles.

**Tableau 4.2 : Récapitulatif des avantages et inconvénients de la collecte mécanique par les pelles mécaniques hydrauliques.**

Avantages	Inconvénients
Rendement élevé	Érosion des plages
Risques sanitaires faibles	Risque d'ensablement
Besoin faible en main d'œuvre	Ramassage des matières indésirables
Évacuation des algues facilitée	Entretien régulier de la machinerie
	Accès réduit aux plages
	Risque d'écrasement des nids de tortues
	Formation requise
	Équipement coûteux

Source : Chereau (2019)

## ii. Le ratisseur



**Figure 4.5 : Photographie d'un ratisseur attaché à un tracteur pour le ramassage des sargasses.**  
Source : SAFEGE (2019b)

Le ratisseur est une machine de nettoyage des plages attelé à un tracteur (Figure 4.4, Tableau 4.3). Il est constitué d'un tapis roulant sur lequel sont disposées des dents qui ratissent la plage ramassant les sargasses. Les algues tombent ensuite dans un petit espace de stockage. Cet appareil a été

confectionné pour le nettoyage des plages et est devenu la machine de nettoyage la plus répandue dans le monde (Vos *et al.*, 2016). Dans de bonnes conditions, échouage frais de moins de 30 cm d'épaisseur, le ratisseur possède un rendement d'environ 30 m<sup>3</sup>/h (SAFEGE, 2019b). Un rendement est supérieur à celui de la collecte manuelle, mais il pourrait être plus élevé si le volume de stockage (2,3 m<sup>3</sup>) était plus important ce qui réduirait le nombre d'aller-retour. Puisqu'il est spécifiquement élaboré pour le nettoyage des plages, il récolte peu de sable (~1,5 % du volume) et limite ainsi l'érosion des plages. Le tracteur dispose d'une bonne mobilité s'il est équipé de pneus basse pression et haute portance. Cependant, un échouage trop important peut entraver la circulation du véhicule et nécessiter plusieurs passages. Cette méthode est polyvalente et permet même de travailler dans une faible profondeur d'eau. Elle offre aussi à la plage un rendu visuel propre.

**Tableau 4.3 : Récapitulatif des avantages et inconvénients de la collecte mécanique grâce au ratisseur.**

<b>Avantages</b>	<b>Inconvénients</b>
Rendement élevé	Risque d'écrasement des nids de tortues
Faible érosion des plages	Risque d'ensablement
Risques sanitaires faibles	Capacité de stockage limitée
Besoin faible en main d'œuvre	Ramassage des matières indésirables
Évacuation des algues facilitée	Entretien régulier de la machinerie
Polyvalence	Accès réduit aux plages
Bonne mobilité	Formation requise
	Nécessité de plusieurs passages
	Équipement coûteux

Source : SAFEGE (2019b); Vos *et al.* (2016)

### iii. Le véhicule automoteur de ramassage d'AXINOR



**Figure 4.6 : Photographie du véhicule automoteur d'AXINOR.** Source : SAFEGE (2019c)

Le véhicule automoteur de ramassage d'AXINOR est un troisième moyen de collecte des sargasses (SAFEGE, 2019c). Comme le ratisseur, il compte sur le même système de tapis roulant à dent pour ratisser le sol. Les algues récoltées tombent alors sur un tapis convoyeur les dirigeant vers la benne de stockage de 20 m<sup>3</sup> situé à l'arrière du véhicule (Figure 4.5, Tableau 4.4). Cette importante capacité de stockage constitue un grand avantage qui joue dans son rendement considérable pouvant atteindre 100 m<sup>3</sup>/h dans de bonnes conditions. La réduction du nombre d'aller-retour au point de vidange permet aussi de réduire l'incidence de la circulation sur la plage. Cette méthode de récolte permet de laisser une fine couche d'algues pour assurer leur rôle écologique dans les systèmes côtiers. Le véhicule possède aussi un faible taux de collecte de sable (~1 % du volume) qui limite l'érosion de la plage dans le cas d'un ramassage régulier. S'il est équipé de pneus basse pression et haute portance, il dispose d'une bonne mobilité sur la plage. Cependant, ses dimensions imposantes (10 m L, 2,5 m l, 3,5 m H) le limitent aux seules plages où il est possible de le manœuvrer. Le camion est cependant très polyvalent dans son action : il peut intervenir sur différents types d'échouage et travailler dans une faible profondeur d'eau. Il peut aussi utiliser la route et sa capacité de stockage lui permet d'évacuer les algues du site si nécessaire. Le principal inconvénient mécanique est le risque de bourrage. En effet, les algues anciennes compactées ou gorgées d'eau peuvent alors bloquer le collecteur latéral responsable du déchargement.

**Tableau 4.4 : Récapitulatif des avantages et inconvénients de la collecte mécanique grâce au véhicule de ramassage d'AXINOR.**

Avantages	Inconvénients
Rendement élevé	Risque d'écrasement des nids de tortues
Capacité de stockage importante	Risque d'ensablement
Bonne mobilité	Ramassage des matières indésirables
Faible érosion des plages	Entretien régulier de la machinerie
Faible exposition sanitaire	Accès réduit aux plages
Peu de main d'œuvre	Formation requise
Évacuation des algues facilitée	Risque de bourrage
Polyvalence	Équipement coûteux
Autonomie	
Maintien d'une fine couche d'algues	

Source : SAFEGE (2019c)

#### iv. Le Cane Loader



**Figure 4.7 : Photographie du Cane Loader utilisé habituellement dans les plantations de cannes à sucre.** Source : SAFEGE (2019d)

Le Cane loader est un autre véhicule permettant le ramassage mécanique des sargasses sur la plage (SAFEGE, 2019d; Vos *et al.*, 2016). Son nom provient de sa fonction première dans la récolte de la canne à sucre. Il est composé d'un châssis avec un court bras hydraulique sur lequel est fixé l'équipement de ramassage (Figure 4.6, Tableau 4.5). Le rendement du Cane loader dépend des conditions du terrain et de l'épaisseur de l'échouage. Un échouage épars (<10 cm) diminue considérablement le rendement qui tombe à 30-40 m<sup>3</sup>/h contre 170 m<sup>3</sup>/h à 210 m<sup>3</sup>/h pour une

épaisseur d'échouage de 50 cm. Dans ces dernières conditions, il possède alors le meilleur rendement des véhicules de récolte terrestre. Sa structure sur trois roues et l'utilisation de pneus basse pression et haute portance lui offrent une bonne mobilité sur les berges. Il peut aussi se déplacer à bonne distance de la benne de collecte et n'est pas entravé par les échouages importants. Toutefois, il pâtit des mêmes inconvénients que les autres véhicules. Il présente un risque élevé de destruction des nids de tortues, un accès réduit aux plages et la récolte les déchets de la plage avec les algues. Le poste de pilotage ouvert et proche du sol expose aussi le conducteur à la chaleur et au sulfure d'hydrogène.

**Tableau 4.5 : Récapitulatif des avantages et inconvénients de la collecte mécanique grâce au Cane loader.**

<b>Avantages</b>	<b>Inconvénients</b>
Rendement élevé	Risque d'écrasement des nids de tortues
Bonne mobilité et maniabilité	Rendement très dépendant des conditions
Utilisation possible sur des algues fraîches, mais aussi anciennes	Ramassage des matières indésirables
Évacuation des algues facilitée	Entretien régulier de la machinerie
Peu de main d'œuvre	Accès réduit aux plages
	Risques sanitaires forts
	Formation requise
	Nécessité d'un camion-benne à disposition

Source : SAFEGE (2019d); Vos *et al.* (2016)

## v. Le grutage



**Figure 4.8 : Photographie de la technique de grutage avec une benne grillagée.**  
Source : SAFEGE (2019e)

Une méthode de récolte peu usuelle a récemment été développée par une société de transport et de manutention (SAFEGE, 2019e). Elle consiste en une technique de grutage permettant depuis la rive de récolter les algues en bord de mer. Une petite benne grillagée racle la surface ou le fond de l'eau par une grue mobile sur la berge (Figure 4.7, Tableau 4.6). L'idée présente quelques avantages puisque la méthode est mobile et peut récolter les sargasses où les autres méthodes ne peuvent se rendre. Cependant, cette méthode présente pour le moment de nombreux inconvénients notamment du point de vue écologique. Outre le risque d'écrasement des nids de tortues, la benne de collecte peut perturber et dégrader les fonds marins lors de son passage. Les dommages sont cependant à relativiser au regard des impacts négatifs de la décomposition des sargasses dans l'eau. Le grutage peut aussi être ardu par endroit et rendre la collecte plus difficile. L'évacuation des algues est aussi plus compliquée. En effet, le dépôt des algues se réalise à terre et une machine supplémentaire est nécessaire afin de déposer les algues dans un camion-benne.



**Tableau 4.6 : Récapitulatif des avantages et inconvénients de la collecte mécanique grâce au grutage.**

Avantages	Inconvénients
Mobilité	Impacts environnementaux
Technique polyvalente	Accès réduit
Égouttement des algues	Évacuation des algues
Peu de main d'œuvre	Ramassage des matières indésirables
	Risque d'écrasement des nids de tortues
	Formation requise
	Nécessité d'un camion-benne à disposition

Source : SAFEGE (2019e); Vos *et al.* (2016)

#### vi. Le râteau goémonier



**Figure 4.9 : Photographie d'un râteau goémonier.** Source : SAFEGE (2019f)

Enfin, le râteau goémonier est le dernier appareil pouvant être utilisé lors de la collecte à terre. Il est rattaché à un tracteur agricole et se compose de plusieurs dents montées sur des ressorts. Ces dents vont gratter le sol pour regrouper les algues et les déchets (Figure 4.8, Tableau 4.7). Il ne permet pas le ramassage des sargasses en soi, mais aide les véhicules de collecte en regroupant les algues (SAFEGE, 2019f). Le râteau est donc un élément de soutien potentiellement utile lors des faibles échouages pour regrouper les algues, mais devient inutile lors dans le cas d'échouage de moyenne à grande ampleur (>20 cm). L'épaisseur de l'échouage étant suffisante pour maintenir de bon rendement avec les machines de collecte. L'utilisation de ce râteau présente aussi l'inconvénient de mélanger les algues avec le sable. La proportion de sable récolté augmente ce qui

aggrave l'érosion des côtes et augmente le poids des bennes de transport. Les deux avantages du râteau goémonier résident dans le faible risque sanitaire au H<sub>2</sub>S et dans la mobilité offerte par des pneus basse pression et haute portance.

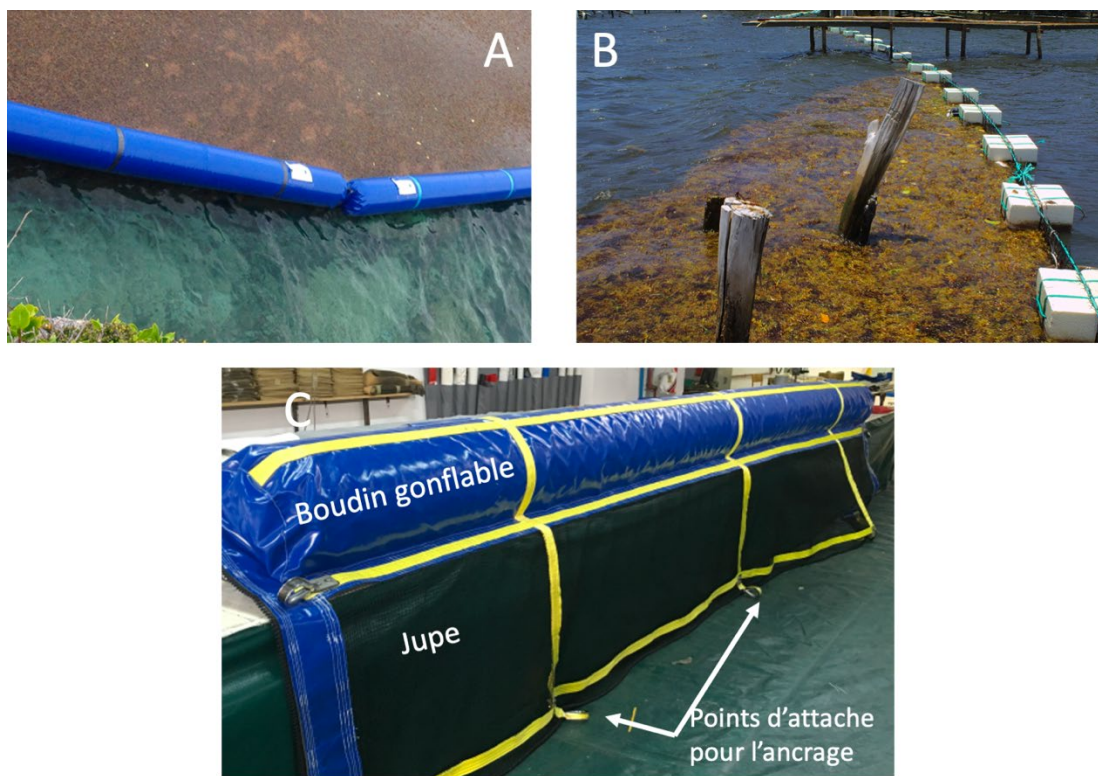
**Tableau 4.7 : Récapitulatif des avantages et inconvénients du râteau goémonier comme aide à la collecte mécanique.**

<b>Avantages</b>	<b>Inconvénients</b>
Risques sanitaires faibles	Élément de soutien
Bonne mobilité	Érosion des plages
	Capacité d'action réduite
	Risque d'ensablement
	Ramassage des matières indésirables
	Entretien régulier de la machinerie
	Accès réduit aux plages
	Risque d'écrasement des nids de tortues
	Formation requise
	Risque de bris

Source : SAFEGE (2019f); Vos *et al.* (2016)

#### **4.2.2. Le ramassage en mer**

Le ramassage en mer constitue la seconde catégorie de méthodes de collecte pouvant être opérationnalisées. Il peut prendre deux formes : la collecte proche du rivage et la collecte en mer. La première est réalisée à l'aide de barges de collecte, de petites à moyennes embarcations équipées d'au moins un tapis convoyeur incliné dans l'eau ce qui permet de récolter mécaniquement les sargasses. Ils sont à combiner avec des barrages flottants qui permettent l'accumulation des algues sur une zone réduite, facilitant ainsi le travail de collecte au bateau (Figure 4.9). La seconde forme, la collecte en mer est réalisée par les embarcations de plus grande taille sur des nappes de sargasses à la dérive.



**Figure 4.10 : Ensemble de trois photographies de barrages flottants.** A : Barrage flottant industriel Algaenova; B : Barrage flottant artisanal; C : Présentation des différentes parties d'un barrage flottant. Source : Algaenova, 2016a; Menez et al., 2018.

#### i. Les barrages flottants

Les barrages sont des dispositifs permettant la concentration, le stockage ou même la déviation des algues afin d'éviter qu'elles atteignent les côtes. Ils sont constitués principalement d'un élément flottant, comme un boudin gonflable, ainsi que d'une jupe sous le barrage dont l'objectif est de contenir les sargasses. Cette jupe est fixée à des ancrages sur le fond marin régulièrement espacés afin de réduire les effets de traction sur les ancrages (Figure 4.9C). L'installation de ces dispositifs est cependant limitée par la profondeur, la houle, les courants, ou la nature du substrat pour les ancrages. Afin de maintenir leur intégrité et leur fonction, ils doivent aussi être retirés lorsque les conditions météorologiques sont dangereuses pour la structure de l'ouvrage. La vitesse de pose et de retrait lors de la planification des installations devient alors un enjeu (Chereau, 2019). Depuis le

début de la crise des sargasses en 2011, de nombreux modèles artisanaux, mais aussi quelques modèles industriels ont été mis place. Chacun possédant des avantages et des inconvénients.

Les modèles artisanaux (Figure 4.9B; Tableau 4.8) peuvent être élaborés à partir de matériaux de récupération comme c'est le cas des pare-battages, des bouées plastiques ou des blocs modulaires pour les pontons légers. Ils assurent leur rôle de protection des plages ou des criques en empêchant l'échouage des nappes des sargasses. Certains sont très faciles à mettre en place et à enlever, d'autres ont des jupes plus longues, très utiles dans le cas de grande accumulation, ou des points d'ancrage de meilleure qualité (SAFEGE, 2019g, 2019h). Les modèles industriels (Figure 4.9A; Tableau 4.9), comme ceux proposés par Algaenova ou RISK, possèdent le grand avantage d'être un produit industriel (SAFEGE, 2019i, 2019j). Ils peuvent donc être commandés en grande quantité. Ils sont aussi composés d'éléments modulaires permettant de l'adapter à la taille souhaitée et de remplacer les éléments défectueux. La structure de leur jupe facilite leur entretien grâce à des machines spécialisées. Comme pour les modèles artisanaux, la longueur de la jupe leur permet de retenir d'importantes quantités de sargasses, mais laisse passer les animaux marins.

Quels que soient les modèles, industriels ou artisanaux, les barrages flottants possèdent les mêmes inconvénients. Leur installation est très dépendante des conditions physiques du milieu, la connaissance de celui-ci et la planification est donc primordiale pour une mise en place réussie et une utilisation efficace. Le second désavantage des barrages flottants est la nécessité d'un entretien régulier pour éviter la colonisation du barrage par des organismes marins ainsi que l'usure mécanique du barrage. Cet entretien peut être facilité par la qualité et la nature de la jupe c'est notamment le cas des barrages de chez RISK (Chereau, 2019). De leur côté Algaenova développe un bateau nettoyeur afin de nettoyer la jupe et le flotteur (Algaenova, 2016b; SAFEGE, 2019i). Puisque les barrages ne permettent pas la récolte directe, il est nécessaire de les coupler avec des techniques de ramassage. La récolte doit être régulière afin d'éviter l'accumulation trop importante et la décomposition des algues ainsi que la rupture du barrage. Enfin, la mise en place de barrages flottants peut être responsable de la modification de la profondeur locale. En effet, il a été noté qu'en cas de faible profondeur la mise en place des barrages provoque un affouillement probablement lié à la modification des courants sous le barrage.

**Tableau 4.8 : Récapitulatif des avantages et inconvénients des barrages flottants artisanaux.**

Avantages	Inconvénients
Utilisation de matériaux de récupération adaptés	Installation dépendante des conditions du milieu
Protection du littoral	Entretien nécessaire
Mise en place simple	Couplage avec une méthode de collecte
Jupe longue permettant de contenir la très grande majorité des algues	Modification de la profondeur sous le barrage
	Nécessité de retrait en cas de conditions défavorables
	Risque de bris

Source : SAFEGE (2019g, 2019h)

**Tableau 4.9 : Récapitulatif des avantages et inconvénients des barrages flottants industriels.**

Avantages	Inconvénients
Protection du littoral	Installation dépendante des conditions du milieu
Mise en place et remplacement simple	Entretien nécessaire
Jupe longue permettant de contenir la très grande majorité des algues	Couplage avec une méthode de collecte
Stockage limité grâce aux boudins gonflables	Modification de la profondeur sous le barrage
Taille de la maille réduit le risque de capture des espèces marine (ex : tortues)	Nécessité de retrait en cas de conditions défavorables

Source : SAFEGE (2019i, 2019j)

## ii. Les barges de collecte

Les barrages mis en place ont pour fonction de concentrer les sargasses dans un espace restreint afin de faciliter leur récolte par des barges de collecte fonctionnant dans les eaux côtières de faible profondeur. Ces barges consistent en des embarcations motorisées en aluminium et équipées d'un ou plusieurs tapis ou convoyeur de collectes ainsi que d'un espace de stockage (Figure 4.10). Désormais, plusieurs sociétés proposent des systèmes de barrages et de barges de collecte comme la société Algaenova (Algaenova, 2016a). La France et le Mexique ont aussi opté pour ces solutions comme moyen de récoltes. La France possède au moins deux bateaux de collecte de ce type, un en Guadeloupe et un en Martinique disposant chacun d'une capacité de stockage de 9 m<sup>3</sup>. Le Mexique

en possède déjà trois et devrait doubler ses effectifs d'ici la fin de l'année puisque trois autres barges de collecte sont actuellement en construction (Info Punto MX, 2020).



**Figure 4.11 : Photographie d'une barge de collecte dans les eaux côtières.** Source : Stimpfling, 2015.

Le rendement de collecte de ces barges est encore une fois très variable selon les conditions et dépend des mêmes facteurs utilisés précédemment. Pour les deux navires français, le rendement oscille entre  $8 \text{ m}^3/\text{h}$  et  $19 \text{ m}^3/\text{h}$ , selon que les conditions soient mauvaises, temps de trajet long ( $T_t = 25 \text{ min}$ ) et nappes éparses (temps de collecte  $T_c = 30 \text{ min}$ ), ou qu'elles soient bonnes, temps de trajet court ( $T_t = 5 \text{ min}$ ) et nappes denses ( $T_c = 9 \text{ min}$ ) (SAFEGE, 2019k). Les bateaux mexicains disposent quant à eux d'une capacité de stockage d'environ  $20 \text{ m}^3$  soit plus du double de la capacité des deux bateaux français évalués. En reprenant la méthodologie utilisée par SAFEGE (capacité  $C = 20 \text{ m}^3$ ,  $T_c = 18 \text{ min}$  ou  $60 \text{ min}$ ,  $T_t = 5 \text{ min}$  ou  $25 \text{ min}$ , Temps de vidange  $T_v = 30 \text{ min}$ )<sup>3</sup>, le rendement de ce type de bateau varierait entre  $10$  et  $23 \text{ m}^3/\text{h}$ . L'utilisation couplée des barrages et de cette méthode de ramassage permet d'augmenter le rendement en augmentant la densité des nappes ce qui réduit considérablement le temps de collecte. Le rendement se rapprocherait ainsi plus de l'estimation haute. De son côté, la barge de collecte d'Algaenova affiche un rendement global de  $25$  à  $30 \text{ m}^3/\text{h}$ .

---

<sup>3</sup> Les temps de collecte et de vidange ont été multipliés par deux puisque la capacité de stockage a été doublée. Ils sont utilisés à titre indicatif et il est possible que les temps de collecte et de vidange réels soient inférieurs à ces estimations. Le rendement serait alors supérieur aux valeurs calculées.

Outre son rendement, ces embarcations possèdent de nombreux avantages (Tableau 4.10). Elles possèdent une bonne mobilité grâce à la taille et au faible tirant d'eau pour collecter les algues au niveau des barrages de rétention et elles peuvent accéder facilement aux pontons afin de déposer les sargasses récoltées. Cette méthode de collecte est aussi avantageuse puisqu'elle n'affecte pas les plages et n'engendre ni érosion ni destruction des nids de tortues. La collecte dans le proche côtier permet aussi d'intervenir avant la décomposition des algues et donc avant la libération d'H<sub>2</sub>S dans l'air et d'azote ainsi que de phosphore dans l'eau. Les sargasses récoltées sont aussi dépourvues de sables ce qui dans le cas de la valorisation permet de réduire les opérations de nettoyages. Il est toutefois possible de rencontrer des macrodéchets comme des plastiques dans les nappes d'algues, mais cette méthode de collecte ne permet pas de réaliser un tri. Ceci constitue le premier de ses inconvénients puisque l'objectif de la récolte des sargasses est leur valorisation grâce à la production de biogaz. Dans le cas de nappes éparées, cette méthode possède un rendement assez faible, il est donc fortement conseillé de la coupler à des barrages flottants pour réduire le temps de collecte et protéger les plages, mais ceci implique des coûts supplémentaires. La zone d'action des bateaux constitue aussi un inconvénient puisqu'elle est limitée par la vitesse de déplacement du bateau ainsi que par les conditions météorologiques. Il n'est pas possible de sortir en mer en cas de vent ou de houle importante. L'utilisation des barges de collecte nécessite entre 4 et 5 personnes pour le bon déroulement des opérations : 3 marins, 1 grutier et finalement 1 chauffeur de camion-benne. Cela constitue un personnel important pour un mode de collecte mécanique. Enfin, sur les modèles français testés, la capacité de stockage des embarcations constitue le dernier des principaux inconvénients. En effet, la capacité de stockage est limitée ce qui occasionne de nombreux aller-retour vers la terre ferme pour décharger les sargasses récoltées.

**Tableau 4.10 : Récapitulatif des avantages et inconvénients des barges à tapis convoyeur pour la collecte des sargasses.**

Avantages	Inconvénients
Bonne mobilité	Capacité de stockage limité
Absence de répercussion sur les plages	Ramassage indifférencié
Collecte avant la décomposition	Couplage avec des barrages flottants conseillé
Collecte dépourvue de sable	Zone d'action limitée
	Besoin de 5 personnes
	Entretien régulier

Source : SAFEGE (2019k)



### iii. La drague aspiratrice en marche

La seconde option de ramassage en mer est mise en place au large où de plus grands bateaux peuvent être utilisés (Figure 4.11; Tableau 4.11). Le Mexique s'est notamment servi des embarcations de sa marine pour récolter 495 t de sargasses de mai à septembre 2019 (SEMAR, 2019b). Ces actions de collecte en haute mer peuvent être menées à bien par de nombreuses embarcations, mais celle présentant le plus d'intérêt semble être la drague aspiratrice en marche (DAM). Il s'agit d'un navire motorisé utilisé pour le dragage de matériaux comme le sable ou le gravier dans les travaux maritimes. Cette option a été envisagée et évaluée par SAFEGE au cours de leur mandat pour l'ADEME à bord du bateau ELBE (SAFEGE, 2019I). Il en résulte que la collecte est particulièrement efficace sur des nappes d'algues denses avec un rendement de collecte estimé à 450 m<sup>3</sup>/h. Ce rendement théorique est le plus important de toutes les méthodes évaluées et cela constitue le principal avantage de cette technique avec la grande capacité de stockage de ce type de bateau. De plus, grâce à leur action en mer, les DAM ne sont pas responsables de l'érosion des plages ou de la destruction des nids de tortues.



**Figure 4.12 : Photographie d'une drague aspiratrice en marche (DAM).** Source : Damen (2020)

Comme les barges à tapis convoyeurs, les algues sont récoltées avant leur décomposition et sont libres de tout sable. Cependant, la collecte par DAM possède un grand nombre d'inconvénients. Tout d'abord d'un point de vue écologique, cette méthode collecte les sargasses à un stade où elles ne sont pas nuisibles aux activités humaines ou aux écosystèmes. À cette étape, elles jouent leur



rôle écologique et constituent une oasis de vie dans l’océan qui concentre les poissons. Il est donc préjudiciable d’intervenir à ce stade. Ensuite, l’intervention d’un tel navire nécessite un couplage avec un système de suivi du déplacement des nappes afin de planifier les interventions et de guider le bateau. La zone d’action et la mobilité de la DAM sont limitées en raison de ses dimensions, de la vitesse de déplacement et de son tirant d’eau. Ceci limite son utilisation à la mer, rend la collecte complexe et empêche la collecte totale des nappes d’algues. Le déplacement du bateau lors de la récolte provoque aussi la fragmentation et la dispersion de la nappe d’algues récoltée. Par conséquent, le rendement de collecte diminue à mesure des différents passages par perte en densité de la nappe. Ce rendement est aussi très dépendant de la capacité à rejoindre et de travailler sur des quantités importantes d’algues.

Cette méthode, bien qu’elle dispose d’un très haut rendement potentiel de collecte, possède bon nombre d’inconvénients comme sa maniabilité qui la rendent moins attractive qu’à première vue. L’objectif étant d’identifier les méthodes les plus efficaces et respectueuses de l’environnement, cette technique perd tout son intérêt. Pour la méthanisation, les sargasses récoltées en haute mer ne constituent pas le meilleur substrat. En effet, elles possèdent un rapport C : N proche de 50 quand les conditions optimales se situent entre 20 et 30 (Lapointe, 1995).

**Tableau 4.11 : Récapitulatif des avantages et inconvénients des dragues aspiratrices en marche (DAM) pour la collecte des sargasses.**

Avantages	Inconvénients
Rendement de collecte potentielle important	Collecte de la nappe à un stade non néfaste
Absence de répercussion sur les plages	Nécessité de couplage avec un système de suivi
Collecte avant la décomposition	Zone d’action limitée
Collecte dépourvue de sable	Dispersion de la nappe
Capacité de stockage importante	Ramassage indifférencié
	Rendement très variable
	Faible maniabilité du navire
	Tirant d’eau important
	Diminution du rendement de collecte à mesure de la récolte d’une nappe d’algue.
	Entretien régulier nécessaire

Source : SAFEGE (2019I)

### 4.3. Méthodes de stockage et de préservation

Le stockage et la conservation des algues forment des piliers essentiels à la valorisation des sargasses. Celles-ci ne s'échouant pas toute l'année, il est nécessaire de trouver des méthodes de stockage et de conservation afin d'alimenter en continu les unités de méthanisation. De nombreuses méthodes existent pour la conservation des produits agricoles, mais deux techniques sont utilisées pour la conservation d'une importante biomasse.

#### 4.3.1. L'assèchement

Le séchage est une méthode permettant de réduire la quantité d'eau contenue dans les algues (Tableau 4.12). Afin d'assurer la conservation des algues dans la durée, la teneur en eau doit diminuer de 75-90 % à moins de 22 % (Philippsen *et al.*, 2014). Bien qu'il ne soit pas un prérequis pour la méthanisation, il permet d'allonger la durée de vie de la biomasse. Il réduit aussi les coûts associés au transport entre le lieu de collecte et les unités de méthanisation (Maneein *et al.*, 2018). Cependant, il faut apporter une énergie de  $\sim 2,6 \text{ MJ.kg}^{-1}$  pour chauffer l'eau de 20 à 100 °C et l'amener à évaporation, le séchage est un procédé très demandant en énergie (Milledge & Heaven, 2014) et donc en combustibles fossiles. Dans le cadre de la production de biogaz, l'utilisation de combustibles fossiles alourdit le bilan carbone la rendant moins intéressante.

La solution la plus utilisée dans les pays tropicaux pour faire face à cette demande énergétique est l'utilisation du soleil pour déshydrater les sargasses (Milledge & Harvey, 2016c). Le processus de séchage peut prendre de 2 à 3 jours avec un temps ensoleillé et jusqu'à 7 jours lors de la saison des pluies (Valderrma *et al.*, 2014). Si elle demande peu d'investissement énergétique, elle nécessite cependant de larges étendues pour sécher les algues puisque la production de 100 g de matière sèche nécessite un mètre carré (Milledge & Harvey, 2016c). Ces surfaces doivent être situées près des lieux de récoltes, mais aussi des unités de méthanisation pour réduire les coûts de transport. Ceci peut devenir un problème puisque les sargasses s'échouent principalement dans la région touristique de la Riviera Maya qui concentre une partie importante de la population. Bien qu'il existe des terres disponibles, ces surfaces pourraient alors entrer en concurrence avec le développement

des villes ou du tourisme. La disposition de ces surfaces doit donc prendre en considération l'expansion des villes.

Une autre solution potentielle permettant de sécher les algues à moindre coût serait d'utiliser la chaleur générée par les transformateurs. Cela suppose cependant que les unités de méthanisation ont un but de production d'électricité et possède un moteur permettant la cogénération d'électricité et de chaleur. Le séchage perd cependant l'avantage de la réduction du transport puisque les algues doivent être amenées fraîches aux unités de production de biogaz.

**Tableau 4.12 : Récapitulatif des avantages et inconvénients du séchage solaire comme méthode de préservation des sargasses.**

Avantages	Inconvénients
Réduction du transport	Dépendant des conditions météorologiques
Très utilisé pour la conservation d'autres algues	Surface nécessaire très élevée
Faible demande énergétique (autre que solaire)	Concurrence pour l'accès aux terres
	Déforestation/Changement d'utilisation des terres

#### 4.3.2. L'ensilage

L'ensilage est la deuxième méthode disponible pour la préservation et le stockage des sargasses. Elle est une technique utilisée dans la conservation des fourrages pour l'alimentation du bétail (Figure 4.12, Tableau 4.13). Durant l'ensilage, les glucides solubles dans l'eau sont transformés en acide lactique et en d'autres acides organiques au cours d'un processus chimique appelé la fermentation lactique (Oude Elferink *et al.*, 2000). Cette transformation libère des ions  $H^+$  entraînant une diminution du pH qui limite la croissance des microorganismes. Tant que la biomasse n'est pas exposée à l'air, les bactéries résistantes à l'acidité restent inactives ou survivent sous forme de spores. Ceci permet ainsi de conserver la biomasse pour son utilisation future.



**Figure 4.13 : Ensilage d'herbe.** Une bâche étanche est déployée sur l'herbe compactée afin de maintenir les conditions anaérobies nécessaires à la fermentation lactique.

Si l'ensilage est très utilisé pour la conservation de la biomasse terrestre, son application à la préservation des algues a été relativement peu étudiée (Herrmann *et al.*, 2015; Maneein *et al.*, 2018; Milledge & Harvey, 2016b; Milledge & Harvey, 2016c). Cependant, il semble qu'il s'agisse d'une bonne méthode de stockage et de conservation demandant un très faible apport énergétique contrairement au séchage. En 2015, Herrmann *et al.* ont ainsi testé la conservation durant 90 jours de 5 espèces d'algues pour la production de biogaz. Ils ont montré que l'ensilage était effectivement une méthode prometteuse pour la conservation et le stockage des algues dans une optique de production de biogaz. Les produits de la fermentation lactique peuvent augmenter les rendements en méthane et compenser les pertes liées au stockage. Cependant, l'ensilage reste une méthode difficile à maîtriser en raison de la faible teneur en glucides hydrosolubles et du pouvoir tampon élevé des algues qui empêchent la diminution du pH et leur préservation. Elle produit aussi beaucoup d'effluents, jusqu'à un tiers de la biomasse est rejetée sous cette forme. Les auteurs finissent donc par conclure de la nécessité de futures recherches pour améliorer la fermentation lactique durant l'ensilage et réduire la production d'effluent.

Milledge & Harvey (2016b) se sont intéressés à la préservation durant 60 jours de *Sargassum muticum* pour la production de biogaz et ils en ont tiré des conclusions similaires. L'ensilage est une méthode efficace et peu énergivore de conservation des algues. Les auteurs n'ont cependant pas

observé d'effet significatif sur le rendement méthanogène. L'ensilage entraîne une réduction de la concentration en sel et pourrait être à l'origine de la disparition de la quasi-totalité du soufre organique. Ceci constitue un avantage certain puisque ces deux paramètres peuvent poser des problèmes lors de la méthanisation. Cependant, une étude plus récente n'a pas montré de diminution significative du soufre organique (Milledge *et al.*, 2018). Puisque dans les deux cas l'ensilage reposait sur les bactéries déjà présentes, les auteurs supposent que la faible présence de bactéries sulfatoréductrices dans la seconde expérience serait à l'origine de cette différence.

Dans ces expériences, le délai de stockage est limité à 60 et 90 jours, ce qui est insuffisant pour pouvoir approvisionner les unités de méthanisation toute l'année. Cependant, il est possible que des avancées dans le domaine puissent permettre d'augmenter ce temps de conservation. Les cultures énergétiques peuvent en effet être conservées jusqu'à 11 mois après leur récolte et garder leur rendement méthanogène (Seppälä *et al.*, 2008). Des recherches sont donc encore nécessaires afin d'améliorer le temps de préservation des algues.

**Tableau 4.13 : Récapitulatif des avantages et inconvénients de l'ensilage comme méthode de préservation des sargasses.**

Avantages	Inconvénients
Bonne conservation du potentiel méthanogène	Production d'effluent
Peu énergivore	Difficilement maitrisable
Réduction de la concentration en sel	Délai de préservation expérimental de 60 à 90 jours
Élimination totale du soufre organique (?)	Recherches nécessaires pour une meilleure conservation dans le temps

#### 4.4. Cosubstrats disponibles

La codigestion est une solution permettant de faire face à plusieurs des obstacles que pose la digestion des sargasses. En premier lieu, elle permettrait dans une certaine mesure de répondre à l'intermittence des sargasses et à la fluctuation annuelle des flux. Ces flux de sargasses sont concentrés dans la région la plus peuplée de l'état du Quintana Roo. Ceci représente un avantage certain puisque c'est ici que se trouve la main d'œuvre, mais aussi certains cosubstrats comme les déchets organiques ou les boues d'épuration. L'utilisation de ce second flux augmenterait les

rendements méthanogènes en rapprochant le ratio C : N de son optimum. Ceci pourrait compenser les effets inhibiteurs de la concentration en sel et en composés phénoliques.

#### **4.4.1. Les déchets municipaux**

L'utilisation des déchets municipaux est la première des options de codigestion. Le Quintana Roo dispose des services permettant d'assurer la récolte des déchets domestiques de 80 % des habitations (INEGI, 2010). Ces services assurent la collecte journalière de plus de 2075 tonnes par jour (INEGI, 2014). Dans le cas de la municipalité de Benito Juárez, située dans le nord de l'état et comprenant la ville de Cancún, la collecte des matières résiduelles s'élevait à près de 301 000 tonnes en 2009 (Ay Robertos *et al.*, 2010). Plus de la moitié de ce flux est constitué de résidus alimentaires organiques qui peuvent être valorisés au travers de la méthanisation. Ce flux constituerait un bon cosubstrat puisqu'il augmente significativement le rendement méthanogène (Cogan & Antizar-Ladislao, 2016; Kim *et al.*, 2019; Suhartini *et al.*, 2020). Leur production relativement stable durant toute l'année est en plus un avantage certain. Dans les conditions actuelles, le volume de matière organique collecté par la municipalité de Benito Juárez (~150 000 t/an en 2009) est supérieur aux volumes de sargasses récoltés officiellement (83 507 t en 2019) (SEMAR, 2019a). Leur digestion peut aussi être réalisée sans les algues pendant les périodes creuses. De plus, la faible distance séparant ces matières résiduelles et les flux de sargasses permettrait de limiter le transport et les coûts associés.

L'utilisation des déchets organiques municipaux implique cependant la mise en place d'un tri afin de différencier les matières organiques du reste des déchets ménagers. Celui-ci doit être réalisé par les habitants ou bien par les sociétés de collectes, mais ceci augmenterait les coûts.

#### **4.4.2. Les boues d'épuration**

Le deuxième cosubstrat potentiel correspond aux boues d'épuration. Elles sont issues du traitement des eaux grises produites par les habitants et forment comme les déchets ménagers un flux relativement constant. En France, ces boues déjà utilisées en méthanisation participent à hauteur

de 5 % dans la production de biogaz en 2010 (Reverdy *et al.*, 2011). Elles pourraient donc constituer un cosubstrat potentiel dans le cas de la méthanisation des sargasses. Cette solution présente les mêmes avantages que l'utilisation des déchets ménagers. La production des boues est constante toute l'année et ce qui permet même en l'absence d'algues de maintenir les unités de méthanisation en fonctionnement.

La production de ces boues est réalisée près des centres urbains ce qui limite les coûts du transport. La qualité des boues doit cependant être testée régulièrement afin d'assurer l'absence d'inhibiteurs ou de polluant pouvant altérer la digestion. En effet, leur présence pourrait réduire les performances des microorganismes dans les réacteurs et compromettre la valorisation du digestat.

#### **4.4.3. Les déchets agricoles**

Enfin, la dernière option consiste en l'utilisation des matières résiduelles agricoles produites par le Quintana Roo ou par les autres états de la péninsule. Le fumier et les déjections animales sont des matières résiduelles intéressantes puisqu'ils sont déjà utilisés comme substrat dans les cas de méthanisation à la ferme en France et ailleurs (Moletta, 2011). Dans le cas de la digestion des algues, ils représentent un bon cosubstrat en augmentant le potentiel méthanogène (Akila *et al.*, 2019). Ils peuvent provenir des exploitations agricoles élevant près de 8000 bovins en étable et en pâturage contrôlé dans le Quintana Roo ou bien des 46 000 et 32 000 animaux élevés dans les états du Yucatan et de Campeche (INEGI, 2017a, 2017b, 2017c).

D'autres matières résiduelles peuvent aussi être envisagées comme les restes de cannes à sucre issues de la production sucrière. La valorisation des déchets agricoles pose néanmoins de nombreuses contraintes. Tout d'abord, il y a la question du transport associé à la distribution spatiale des unités de méthanisation. Si les réacteurs sont situés sur les fermes ou près d'elles, il faut transporter les algues jusque-là et les stocker. En raison de la quantité de sargasses récoltées, cela représente un ballet incessant et comporte un coût élevé. Dans le cas où elles seraient installées près des villes, à la problématique du coût du transport s'ajoutent les odeurs dégagées par l'entreposage des déchets agricoles. Dans le contexte des échouages du Quintana Roo, ce substrat

est par conséquent bien moins intéressant que les déchets alimentaires ou les boues générés par la population des villes côtières.

#### **4.5. Recommandations**

La méthanisation représente une option de valorisation intéressante pour les sargasses s'échouant sur les côtes du Quintana Roo. Cette solution possède plusieurs avantages, comme fournir une source d'énergie, mais aussi des inconvénients que sont les faibles rendements expérimentaux ainsi que l'intermittence et la variabilité des flux.

La gestion de la variabilité des flux nécessite une logistique particulière permettant de maintenir les réacteurs en fonctionnement toute l'année. Cette gestion doit aussi permettre, au travers de la récolte et du stockage, la préservation des écosystèmes côtiers pour leurs valeurs intrinsèques, mais aussi pour le tourisme. L'organisation de la collecte des sargasses est très dépendante des conditions sur le terrain. L'arbre d'aide à la décision résume les recommandations 1 à 3 et constitue un outil pour aider les gestionnaires (Figure 4.13).

**Recommandation n° 1 :** Favoriser la récolte dans les eaux côtières lorsque les conditions bathymétriques et météorologiques le permettent.

Elle consiste en l'utilisation de barrages flottants industriels permettant la contention des sargasses en un endroit donné. Les barrages industriels sont ici privilégiés à leurs versions artisanales en raison de la facilité de mise en place et de remplacement, pour leur risque de bris moindre ainsi que pour la possibilité de commande importante d'un produit adapté. Les algues dépourvues de sable sont ensuite ramassées par les barges de collecte, sans dégrader le littoral. Celles-ci doivent disposer d'une capacité de stockage appréciable et d'un point de vidange relativement proche du point de collecte pour maintenir leur rendement.



**Recommandation n° 2 :** Collecter mécaniquement les sargasses sur les rives en l'absence de moyens de collecte en mer et de nids de tortues.

Lorsque les conditions du terrain ne permettent pas le ramassage en mer, il faut assurer le ramassage en rive. Dans le cas où le site de collecte est aussi un site de ponte pour les tortues, l'accès doit être strictement interdit à tout véhicule afin d'éviter la destruction des nids. Le gouvernement mexicain a déjà pris cette mesure et identifié les plages de pontes, il est donc aisé de déterminer sur quelle plage il est possible d'intervenir (SEMARNAT, 2019).

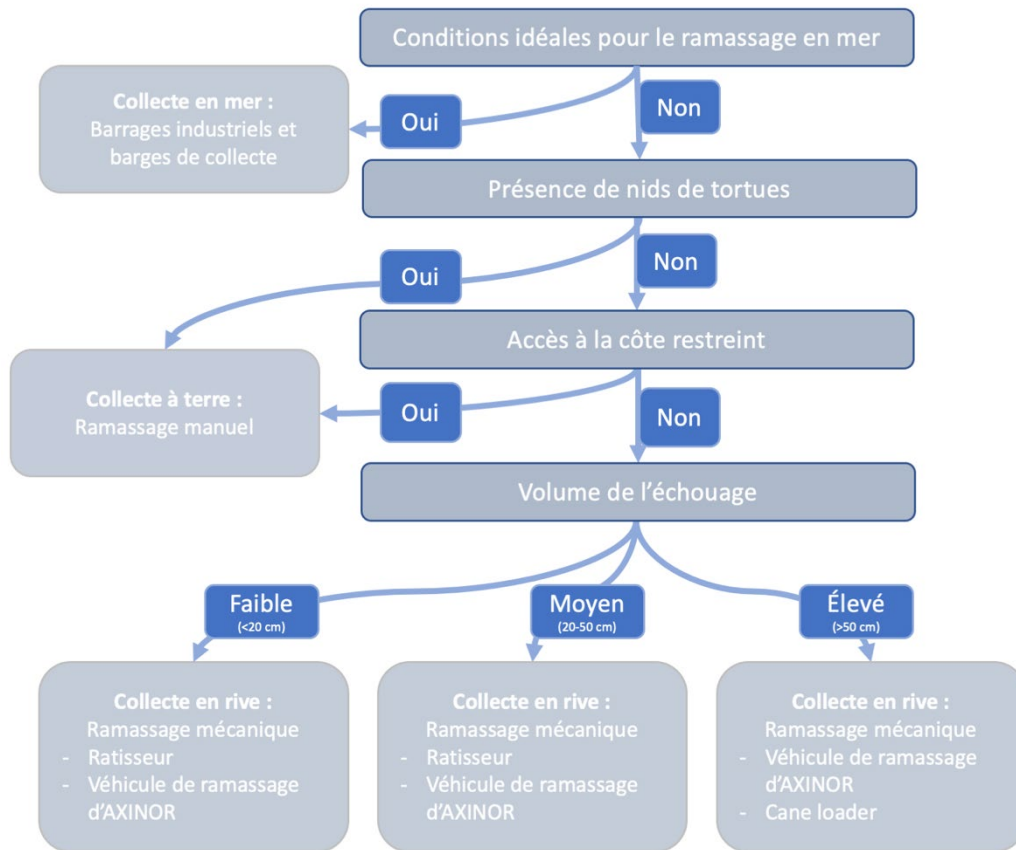
Les véhicules utilisés doivent être spécialisés dans le nettoyage des plages, comme le véhicule d'AXINOR et le ratisseur, et/ou ne recueillir que très peu de sable comme le Cane loader. Le ratisseur peut être utilisé lors des échouages de faible à moyenne intensité en raison de son faible stockage et de sa prédisposition à travailler sur des échouages de moins de 30 cm. Le véhicule d'AXINOR peut être utilisé dans toutes les conditions d'échouage. Le Cane loader, lui, est spécifique aux échouages importants afin de maintenir son rendement élevé et limiter la récolte de sable. En l'absence de ces conditions, son utilisation doit être réduite. Enfin, les véhicules ou outils non spécialisés comme la pelle mécanique et le râteau goémonier ne doivent pas être utilisés. Ils abiment dangereusement le littoral en récoltant le sable et engendrent des coûts de nettoyage plus élevés pour la valorisation des sargasses.

**Recommandation n° 3 :** Effectuer un ramassage manuel dans le cas de l'impossibilité de mettre en place les précédentes méthodes de collecte.

L'absence de conditions bathymétriques et météorologiques idéales, la présence de nids de tortues, ou un accès restreint aux plages empêchent la collecte mécanique en mer et sur la rive. Par conséquent, le ramassage manuel constitue la dernière option de récolte.

Son intervention en dernier ressort se justifie par la nécessité d'un effectif important pour mener à bien le nettoyage des plages en cas de forts échouages. Le rendement par personne est aussi bien inférieur aux autres méthodes de collecte, mais offre une grande adaptabilité. Il doit donc être utilisé lorsque la récolte dans les eaux côtières n'est pas possible et que les rives par leur

accessibilité, leur fragilité ou la présence de nids de tortue n'autorisent pas l'intervention de la machinerie lourde.



**Figure 4.14 : Utilisation des méthodes de collecte des sargasses en fonction des conditions du terrain.**

**Recommandation n° 4 :** Ensiler les sargasses afin de les stocker et de conserver leur qualité dans le temps.

L'ensilage semble être la méthode la plus prometteuse permettant de faire face à l'intermittence des flux d'algues. Elle est une méthode à faible coût énergétique permettant le maintien du potentiel méthanogène et requiert une surface bien inférieure à la méthode du séchage solaire. Elle permet aussi de réduire la quantité de sel dans la biomasse et la disparition complète du soufre en présence de certaines bactéries. Ceci représente un avantage certain puisque ce sont deux éléments

inhibiteurs de la méthanisation. Le choix de cette méthode implique cependant la bonne gestion des effluents pour éviter qu'ils ne se déversent dans l'environnement. Des recherches doivent aussi être menées afin d'évaluer la conservation du potentiel méthanogène des sargasses au-delà de 90 jours.

**Recommandation n° 5 :** Codigérer les algues avec des déchets alimentaires.

Afin d'augmenter les rendements, l'utilisation d'un cosubstrat est recommandée. Le choix de celui-ci se porte préférentiellement sur les déchets organiques générés par des villes côtières. Ce choix se justifie par la disponibilité de la biomasse toute l'année à proximité des lieux de collecte des sargasses. Cette utilisation permet par conséquent de limiter le transport et les dépenses tout en se rapprochant des lieux de consommation du biogaz ou de l'électricité produite. La codigestion permet aussi de maintenir les réacteurs en fonctionnement toute l'année avec un faible rapport algues : déchets alimentaires (Cogan & Antizar-Ladislao, 2016).

La figure 4.14 prend en compte les recommandations 4 et 5 et permet de visualiser l'ensemble du processus de méthanisation. Il s'étend de la collecte des sargasses jusqu'à la valorisation du biogaz et du digestat en passant par les différentes étapes de nettoyage et de tri. Seuls les contrôles qualité restent à mettre en place aux différents niveaux du processus.

**Recommandation n° 6 :** Réaliser des recherches sur l'augmentation du potentiel méthanogène grâce à l'utilisation de prétraitements.

Les rendements expérimentaux de la digestion des sargasses sont bien inférieurs à leurs valeurs théoriques (<50 %). Ceci est relié à la présence de composés difficilement dégradables par les microorganismes. L'utilisation de prétraitements pourrait donc faciliter la digestion et améliorer les rendements. L'association du broyage et de l'autoclave a permis d'augmenter considérablement des rendements méthanogènes obtenus avec *Sargassum sp.* (Costa *et al.*, 2015). Elle constitue un bon prétraitement pour la digestion des algues récoltées. Cependant, des recherches supplémentaires sont nécessaires pour évaluer les effets des autres prétraitements sur la méthanisation de *S. natans* et *S. fluitans* et tirer le meilleur parti des ressources utilisées.

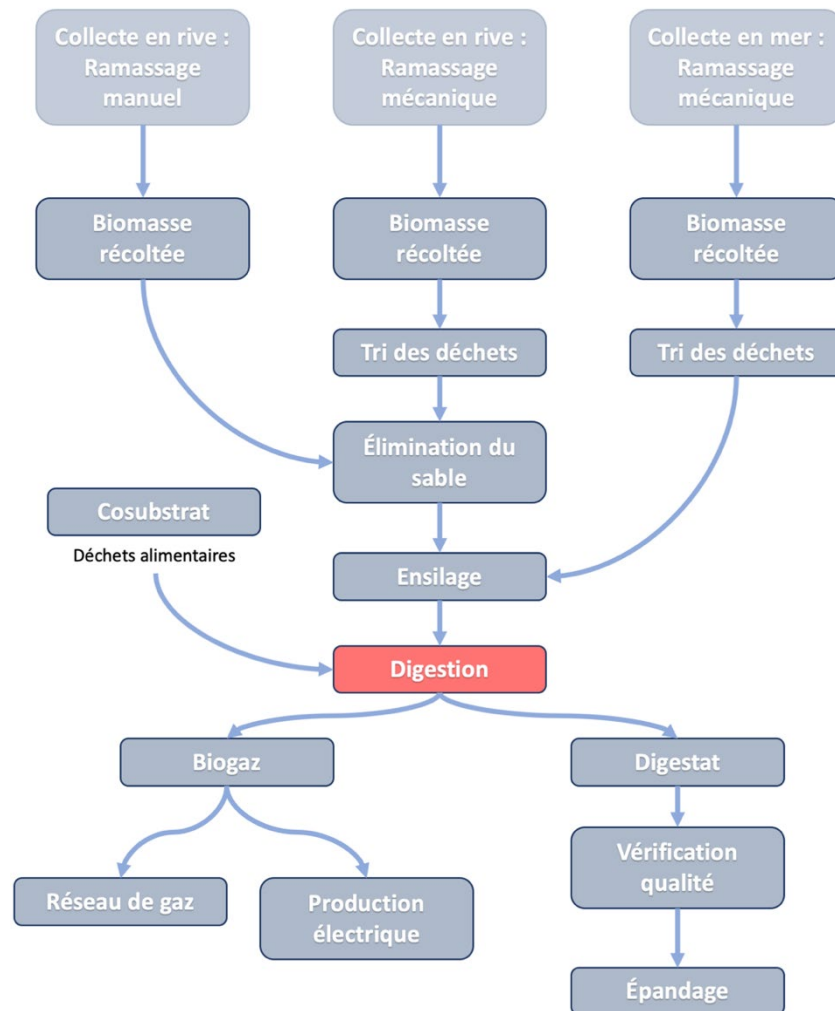


Figure 4.15 : Processus de méthanisation, de la collecte de la biomasse jusqu'à l'utilisation des produits de la digestion.

## Conclusion

Depuis 2014, *S. natans* et *S. fluitans*, deux espèces de macroalgues brunes pélagiques portées par les courants depuis le nord-est du Brésil s'échouent massivement sur les côtes du Quintana Roo. La dégradation de ces sargasses est à l'origine de nuisances pour les touristes, repoussés par le visuel des plages et les émanations de sulfure d'hydrogène. Le tourisme étant le principal moteur économique de cette région, c'est l'ensemble du tissu socioéconomique des villes littorales qui s'en retrouve fragilisé. La putréfaction des algues a aussi des conséquences sur les écosystèmes côtiers. Des changements dans la composition des prairies marines ainsi qu'une mortalité accrue de la faune ont ainsi pu être observés en raison des échouages massifs.

Si la décomposition des algues sur les plages est problématique, leur valorisation serait une solution permettant de financer leur ramassage et de limiter les impacts associés à la putréfaction. Le présent travail avait donc pour but d'évaluer le potentiel des sargasses comme biomasse pour la production de biogaz dans la péninsule du Yucatan. Cet objectif ainsi que les différents objectifs spécifiques fixés ont tous été atteints.

L'évaluation des échouages a révélé la nature intermittente et la grande variabilité interannuelle des flux. Ces deux propriétés peuvent constituer un réel obstacle à leur utilisation. Malgré cela, les sargasses disposent d'un bon potentiel en tant que biomasse pour la production de biogaz. Les volumes récoltés en 2018 et 2019 sont bien inférieurs aux volumes échoués estimés, mais ils suffisent à faire fonctionner plusieurs unités de méthanisation. Ces deux années ont été exceptionnelles et ne reflètent pas forcément la réalité des années à venir. Le phénomène est relativement nouveau et par conséquent l'évolution de l'intensité des échouages est incertaine.

Afin de maintenir la production de biogaz ou d'électricité, une bonne gestion des flux de sargasses est donc indispensable. Les différentes méthodes de récolte et de stockage ont donc été identifiées et analysées afin de réaliser plusieurs recommandations. Dans des conditions optimales, la récolte doit être réalisée en mer dans le proche côtier à l'aide de barrages flottants industriels et de barges de collecte. Ceci permet l'obtention d'algues fraîches dépourvues de sables et limite grandement l'incidence de la récolte sur les écosystèmes côtiers. Si les conditions bathymétriques et

météorologiques ne sont pas réunies et que la situation des rives l'autorise, la machinerie lourde peut être employée. Seuls les véhicules spécialisés ou ceux ne récoltant que très peu de sable doivent être utilisés afin de réduire l'érosion des plages. Dans le cas où ces méthodes ne pourraient être mises en œuvre, un ramassage manuel à l'aide de fourche et de brouette s'impose. Une fois collectées, les sargasses doivent être débarrassées du sable et de leurs déchets avant d'être ensilées pour leur conservation. Le sable récolté peut alors être redistribué sur les plages.

La digestion des macroalgues est pour le moment très loin de son maximum théorique et les sargasses ne font pas exception. Des efforts de recherches doivent donc être encore fournis afin de déterminer la meilleure combinaison de prétraitements physiques, chimiques, biologiques et thermiques pour optimiser leur méthanisation. En attendant ces résultats, la codigestion est l'option la plus profitable. Elle permettrait d'augmenter les rendements tout en limitant les inconvénients de l'utilisation d'un seul substrat temporellement instable. De cette façon, la méthanisation est une solution de valorisation tout à fait envisageable pour face aux échouages massifs, mais irréguliers, de sargasses sur les côtes du Quintana Roo.

## Liste des références

- ADEME (2015). *Fiche technique : Méthanisation*. France, Agence de l'Environnement et de la Maitrise de l'Énergie (ADEME), 19 p.  
<https://www.ademe.fr/sites/default/files/assets/documents/fiche-technique-methanisation-201502.pdf>
- Akila, V., Manikandan, A., Sahaya Sukeetha, D., Balakrishnan, S., Ayyasamy, P. M. & Rajakumar, S. (2019). Biogas and biofertilizer production of marine macroalgae: An effective anaerobic digestion of *Ulva sp.* *Biocatalysis and Agricultural Biotechnology*, vol. 18, p. 101035.
- Aldana, P. G., Camperos, A. R., Orta, L. G. & León, S. C. (2009). Study of coastal erosion in Cancún and Riviera Maya, Mexico. *Avances en Recursos Hidráulicos*, vol. 20, p. 41-55.
- Algaenova. (2016a). Conception & installation de barrages anti-sargasses. *In Algaenova*.  
<http://www.algaenova.com/en/> (Page consultée le 09 juin 2020).
- Algaenova. (2016b). Finally a solution to eradicate the algae Sargasse. *In Algaenova*.  
<http://www.algaenova.com/en/enfin-une-solution-pour-eradiquer-lalgue-sargasse/> (Page consultée le 09 juin 2020).
- Anjaneyulu, K., Tarwadi, S. J. & Mehta, D. J. (1989). Anaerobic digestion of seaweed for biogas: A kinetic evaluation. *Journal of Chemical Technology & Biotechnology*, vol. 45, no 1, p. 5-14.
- Arellano, S. (2018). Sargazo provoca baja de 35% de turismo: alcaldesa electa en QRoo. *In Milenio*, Milenio. <https://www.milenio.com/estados/sargazo-provoca-baja-35-turismo-alcaldesa-electa-qroo> (Page consultée le 12 avril 2020).
- Arreola-Lizarraga, J. A., Garcia Morales, G., Leon-Lopez, C. E. & Ortega-Rubio, A. (2020). Playas recreativas de México: vulnerabilidad y gestión. *In Azuz Adeath et al., Gobernanza y manejo de las costas y mares ante la incertidumbre: una guía para tomadores de decisiones* ( p. 920). Mexique, Université autonome de Campeche, RICOMAR (p. 1-920).
- Atkins, R. P., Deeley, D. M. & McAlpine, K. W. (1993). Managing the aquatic environment. *Fertilizer Research*, vol. 36, no 2, p. 171-175.
- Ay Robertos, F. A., Brinckmann, W. E. & Ayllon Trujillo, M. T. (2010). Disposición final de residuos sólidos en los municipios de Benito Juárez e Isla Mujeres en Quintana Roo. *Ingeniería*, vol. 14, no 3, p. 197-207.
- Bajo Palabra. (2019). Efectos nocivos del sargazo al ponerse en contacto con la piel. *In BajoPalabra*. <https://bajopalabra.com.mx/efectos-nocivos-del-sargazo-al-ponerse-en-contacto-con-la-piel> (Page consultée le 04 février 2020)
- Baker, D. M., Rodríguez-Martínez, R. E. & Fogel, M. L. (2013). Tourism's nitrogen footprint on a Mesoamerican coral reef. *Coral Reefs*, vol. 32, no 3, p. 691-699.

- Barajas, I. A. (1995). Población y economía en el estado de Quintana Roo: algunas consideraciones de la experiencia reciente. *Estudios Demográficos y Urbanos*, vol. 10, no 1, p. 5-33.
- Bernet, N. & Buffière, P. (2011). Caractérisation de la mise en oeuvre de la méthanisation. In Moletta, R., *La méthanisation (2e ed.)* (p. 87-113). Lavoisier.
- Bird, K. T., Chynoweth, D. P. & Jerger, D. E. (1990). Effects of marine algal proximate composition on methane yields. *Journal of Applied Phycology*, vol. 2, no 3, p. 207-213.
- Borines, M. G., de Leon, R. L. & Cuello, J. L. (2013). Bioethanol production from the macroalgae *Sargassum spp.* *Bioresource Technology*, vol. 138, p. 22-29.
- Brodeur, C., Crowley, D., Desmeules, X., Pigeon, S. & St-Arnaud, R.-M. (2008). *La biométhanisation à la ferme*. Québec, Centre de référence en agriculture et agroalimentaire du Québec, 19 p.  
<https://www.craaq.qc.ca/data/DOCUMENTS/EVC033.pdf> (Page consultée le 28 juin 2020)
- Burrowes, R., Wabnitz, C. & Eyzaguirre, J. (2019). The great sargassum disaster of 2018. In ESSA. <https://essa.com/the-great-sargassum-disaster-of-2018/> (Page consultée le 14 avril 2020).
- Burton, T. (2010). *Map of Yucatán Peninsula including Campeche, Mérida, Cancún, Riviera Maya and Cozumel* [document cartographique]. Péninsule du Yucatan.
- Cabanillas-Teran, N., Hernandez-Arana, H. A., Ruiz-Zarate, M.-Á., Vega-Zepeda, A. & Sanchez-Gonzalez, A. (2019). Sargassum blooms in the Caribbean alter the trophic structure of the sea urchin *Diadema antillarum*. *PeerJ*, vol. 7, no 4. doi:10.7717/peerj.7589 (Page consultée le 14 avril 2020).
- Carrillo, L., Lamkin, J. T., Johns, E. M., Vásquez-Yeomans, L., Sosa-Cordero, F., Malca, E., Smith, R. H. & Gerard, T. (2017). Linking oceanographic processes and marine resources in the western Caribbean Sea Large Marine Ecosystem Subarea. *Environmental Development*, vol. 22, p. 84-96.
- Casas-Beltrán, D. A., Gallaher, C. M., Hernandez Yac, E., Febles Moreno, K., Voglesonger, K., Leal-Bautista, R. M. & Lenczewski, M. (2020). Seaweed Invasion! Temporal changes in beach conditions lead to increasing cenote usage and contamination in the Riviera Maya. *Sustainability*, vol. 12, no 6, p. 2474. doi:10.3390/su12062474 (Page consultée le 18 mars 2020).
- Chale-Dzul, J., Freile-Pelegrín, Y., Robledo, D. & Moo-Puc, R. (2017). Protective effect of fucoidans from tropical seaweeds against oxidative stress in HepG2 cells. *Journal of Applied Phycology*, vol. 29, no 5, p. 2229-2238.
- Chávez, G., Candela, J. & Ochoa, J. (2003). Subinertial flows and transports in Cozumel Channel. *Journal of Geophysical Research: Oceans*, vol. 108, no C2.



- Chen, H., Zhou, D., Luo, G., Zhang, S. & Chen, J. (2015). Macroalgae for biofuels production: Progress and perspectives. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, vol. 47, p. 427-437.
- Chereau, E. (2019). *Suivi-évaluation des opérations de collecte de sargasses Rapport de synthèse*. France, Agence de l'Environnement et de la Maitrise de l'Énergie (ADEME) et SAFEGE, 239 p. <https://www.guadeloupe.ademe.fr/sites/default/files/suivi-evaluation-operations-collecte-sargasses.pdf> (Page consultée le 28 juin 2020).
- Child, J. S. (1991). Sargassum identification guide. In Gulf coast research laboratory, *The University of Southern Mississippi*. <http://gcrl.usm.edu/sargassum/sargassum.identification.guide.php> (Page consultée le 25 avril 2020)
- Chynoweth, D. P., Owens, J. M. & Legrand, R. (2001). Renewable methane from anaerobic digestion of biomass. *Renewable Energy*, vol. 22, no 1, p. 1-8.
- Cogan, M. & Antizar-Ladislao, B. (2016). The ability of macroalgae to stabilize and optimize the anaerobic digestion of household food waste. *Biomass and Bioenergy*, vol. 86, p. 146-155.
- Costa, J. C., Oliveira, J. V., Pereira, M. A., Alves, M. M. & Abreu, A. A. (2015). Biohythane production from marine macroalgae *Sargassum sp.* coupling dark fermentation and anaerobic digestion. *Bioresource Technology*, vol. 190, p. 251-256.
- Damen (2020). Drague Aspiratrice en Marche 650. In Damen, *Damen*. [https://products.damen.com:443/fr-fr/ranges/trailing suction hopper dredger/tshd 650](https://products.damen.com:443/fr-fr/ranges/trailing-suction-hopper-dredger/tshd-650) (Page consultée le 17 juin 2020).
- Das, S. K., Hashimoto, T., Shimizu, K., Yoshida T., Sakai, T., Sowa, Y., Komoto, A. & Kanazawa, K. (2005). Fucoxanthin induces cell cycle arrest at G0/G1 phase in human colon carcinoma cells through up-regulation of p21WAF1/Cip1. *Biochimica et Biophysica Acta (BBA) - General Subjects*, vol. 1726, no 3, p. 328-335.
- Davis, T. A., Volesky, B. & Mucci, A. (2003). A review of the biochemistry of heavy metal biosorption by brown algae. *Water Research*, vol. 37, no 18, p. 4311-4330.
- del Río, P. G., Domínguez, E., Domínguez, V. D., Romani, A., Domingues, L. & Garrote, G. (2019). Third generation bioethanol from invasive macroalgae *Sargassum muticum* using autohydrolysis pretreatment as first step of a biorefinery. *Renewable Energy*, vol. 141, p. 728-735.
- Ding, L., Cheng, J., Lin, R., Deng, C., Zhou, J. & Murphy, J. D. (2020). Improving biohydrogen and biomethane co-production via two-stage dark fermentation and anaerobic digestion of the pretreated seaweed *Laminaria digitata*. *Journal of Cleaner Production*, vol. 251, p. 119666.

- Djakouré, S., Araujo, M., Hounsou-Gbo, A., Noriega, C. & Bourlès, B. (2017). On the potential causes of the recent Pelagic Sargassum blooms events in the tropical North Atlantic Ocean. *Biogeosciences Discussions*, p. 1-20.
- ElQuintana Roo. (2019). Amenaza sargazo actividad pesquera en el estado. *In El Quintana Roo MX*. <https://elquintanaroo.mx/amenaza-sargazo-actividad-pesquera-en-el-estado/> (Page consultée le 13 avril 2020).
- Escudero-Castillo, M., Felix-Delgado, A., Silva, R., Mariño-Tapia, I. & Mendoza, E. (2018). Beach erosion and loss of protection environmental services in Cancún, Mexico. *Ocean and Coastal Management*, vol. 156, p. 183-197.
- Flowers, A. & Bird, K. (1984). Marine biomass: A long-term methane supply option. *Hydrobiologia*, vol. 116-117, no 1, p. 272-275.
- Freestone, D., Rose, H., Laffoley, D. & Trott, T. M. (2016). Sargasso Sea. *In Awajin et al., The first global integrated marine assessment - World Ocean Assessment I*, Nations Unies.
- Gamenick, I., Jahn, A., Vopel, K. & Giere, O. (1996). Hypoxia and sulphide as structuring factors in a macrozoobenthic community on the Baltic Sea shore: colonisation studies and tolerance experiments. *Marine Ecology Progress Series*, vol. 144, p. 73-85.
- Gao, G., Clare, A. S., Rose, C. & Caldwell, G. S. (2017). Eutrophication and warming-driven green tides (*Ulva rigida*) are predicted to increase under future climate change scenarios. *Marine Pollution Bulletin*, vol. 114, no 1, p. 439-447.
- García-Sánchez, M., Graham, C., Vera, E., Escalante-Mancera, E., Álvarez-Filip, L. & van Tussenbroek, B. I. (2020). Temporal changes in the composition and biomass of beached pelagic Sargassum species in the Mexican Caribbean. *Aquatic Botany*, vol. 167, p. 103275, doi:10.1016/j.aquabot.2020.103275 (Page consultée le 13 aout 2020)
- Gavio, B., Rincón-Díaz, M. N. & Santos-Martínez, A. (2014). Massive quantities of pelagic Sargassum on the shores of San Andres island, Southwestern caribbean. *Acta Biológica Colombiana*, vol. 20, no 1, p. 239-241.
- Godon, J.-J. (2011). Aspects biochimiques et microbiologiques de la méthanisation. *In Moletta, R., La méthanisation (2e ed.)* (p. 87-113). Lavoisier.
- Gower, J. F. R. & King, S. A. (2011). Distribution of floating Sargassum in the Gulf of Mexico and the Atlantic Ocean mapped using MERIS. *International Journal of Remote Sensing*, vol. 32, no 7, p. 1917-1929.
- Gower, J., Young, E. & King, S. (2013). Satellite images suggest a new Sargassum source region in 2011. *Remote Sensing Letters*, vol. 4, no 8, p. 764-773.

- Guerrero, R. (2019). El sargazo quita el 30% de turismo de Cancún. In *DDG Noticias*.  
<https://ddgnoticias.com/el-sargazo-quita-el-30-de-turismo-a-cancun/> (Page consultée le 13 avril 2020).
- Hernández-Herrera, R. M., Santacruz-Ruvalcaba, F., Ruiz-López, M. A., Norrie, J. et Hernández-Carmona, G. (2014). Effect of liquid seaweed extracts on growth of tomato seedlings (*Solanum lycopersicum* L.). *Journal of Applied Phycology*, vol. 26, no 1, p. 619-628.
- Hernández-Terrones, L., Rebolledo-Vieyra, M., Merino-Ibarra, M., Soto, M., Le-Cossec, A. & Monroy-Ríos, E. (2011). Groundwater pollution in a karstic region (NE Yucatan): Baseline Nutrient Content and Flux to Coastal Ecosystems. *Water, Air, & Soil Pollution*, vol. 218, no 1, p. 517-528.
- Herrmann, C., FitzGerald, J., O'Shea, R., Xia, A., O'Kiely, P. & Murphy, J. D. (2015). Ensiling of seaweed for a seaweed biofuel industry. *Bioresource Technology*, vol. 196, p. 301-313.
- Huckbody. (2016). Sargassum species. Huckbody Environmental Ltd.  
[http://huckbody.com/?attachment\\_id=2064](http://huckbody.com/?attachment_id=2064) (Page consultée le 08 mai 2020).
- INEGI. (2010). *Viviendas particulares habitadas y su distribución porcentual según forma de desechar la basura por entidad federativa*. Quintana Roo. Mexique, Instituto Nacional de Estadística y Geografía,  
<https://www.inegi.org.mx/temas/residuos/default.html#Tabulados> (Page consultée le 18 juin 2020).
- INEGI. (2014). *Promedio diario de residuos sólidos urbanos recolectados por municipio y delegación*. Quintana Roo, Mexique, Instituto Nacional de Estadística y Geografía.  
<https://www.inegi.org.mx/temas/residuos/default.html#Tabulados> (Page consultée le 18 juin 2020).
- INEGI. (2015). *Principales resultados de la Encuesta Intercensal 2015*. Quintana Roo, Mexique, Instituto Nacional de Estadística y Geografía, 103 p.  
[http://internet.contenidos.inegi.org.mx/contenidos/Productos/prod\\_serv/contenidos/espanol/bvinegi/productos/nueva\\_estruc/inter\\_censal/estados2015/702825080136.pdf](http://internet.contenidos.inegi.org.mx/contenidos/Productos/prod_serv/contenidos/espanol/bvinegi/productos/nueva_estruc/inter_censal/estados2015/702825080136.pdf) (Page consultée le 18 mars 2020).
- INEGI. (2016). *Estructura económica de Yucatán en síntesis*. Mexique, Instituto Nacional de Estadística y Geografía, 23 p.  
[http://internet.contenidos.inegi.org.mx/contenidos/Productos/prod\\_serv/contenidos/espanol/bvinegi/productos/nueva\\_estruc/702825088491.pdf](http://internet.contenidos.inegi.org.mx/contenidos/Productos/prod_serv/contenidos/espanol/bvinegi/productos/nueva_estruc/702825088491.pdf) (Page consultée le 18 mars 2020)
- INEGI. (2017). *Anuario estadístico y geográfico de Yucatán 2017*. Mexique, Instituto Nacional de Estadística y Geografía, 711 p.  
[http://internet.contenidos.inegi.org.mx/contenidos/Productos/prod\\_serv/contenidos/espanol/bvinegi/productos/nueva\\_estruc/anuarios\\_2017/702825095116.pdf](http://internet.contenidos.inegi.org.mx/contenidos/Productos/prod_serv/contenidos/espanol/bvinegi/productos/nueva_estruc/anuarios_2017/702825095116.pdf) (Page consultée le 18 mars 2020).

- Info Punto MX. (2020). Arriba a Quintana Roo buque sargacero ARM “Fluitans”. In *Info Punto MX*. <https://infopunto.mx/estados/arriba-a-quintana-roo-buque-sargacero-arm-fluitans/> (Page consultée le 23 juin 2020)
- Institut national de recherche scientifique (2014). *Fiche toxicologique n°32 : Sulfure d’hydrogène*. France, Institut national de recherche scientifique, 8 p. [http://www.inrs.fr/publications/bdd/fichetox/fiche.html?refINRS=FICHETOX\\_32](http://www.inrs.fr/publications/bdd/fichetox/fiche.html?refINRS=FICHETOX_32)
- Jard, G., Marfaing, H., Carrère, H., Delgenes, J. P., Steyer, J. P. & Dumas, C. (2013). French Brittany macroalgae screening: composition and methane potential for potential alternative sources of energy and products. *Bioresource Technology*, vol. 144, p. 492-498.
- Jeetah, P., Bholah, B. & Mohee, R. (2016). Bioethanol production from algae. *International Journal of Global Energy Issues*, vol. 39, no 3-4, p. 204-221.
- Kavin, K. (2018). Sargassum blooms grow monstrous, and researchers say more will come. In *Soundings Online*. <https://www.soundingsonline.com/features/sargassum-blooms-grow-monstrous-and-researchers-say-more-will-come> (Page consultée le 12 avril 2020).
- Kerrison, P. D. (2017). Algae as crops seaweed. In Thomas, B., *Encyclopedia of Applied Plant Sciences* (vol. 3, p. 148-152).
- Kim, J., Baek, G., Kim, J. & Lee, C. (2019). Energy production from different organic wastes by anaerobic co-digestion: Maximizing methane yield versus maximizing synergistic effect. *Renewable Energy*, vol. 136, p. 683-690.
- Laboratoire d’océanographie optique de l’Université de Floride du Sud. (2020). *Outlook of 2020 Sargassum blooms in the Caribbean Sea and Gulf of Mexico* (p. 1). Floride, University of South Florida. <https://optics.marine.usf.edu/projects/SaWS.html> (Page consultée le 9 avril 2020).
- Lapointe, B. E. (1986). Phosphorus-limited photosynthesis and growth of *Sargassum natans* and *Sargassum fluitans* (Phaeophyceae) in the western North Atlantic. *Deep Sea Research Part A. Oceanographic Research Papers*, vol. 33, no 3, p. 391-399.
- Lapointe, B. E. (1995). A comparison of nutrient-limited productivity in *Sargassum natans* from neritic vs. oceanic waters of the western North Atlantic Ocean. *Limnology and Oceanography*, vol. 40, no 3, p. 625-633.
- Lapointe, B. E., West, L. E., Sutton, T. T. & Hu, C. (2014). Ryther revisited: nutrient excretions by fishes enhance productivity of pelagic Sargassum in the western North Atlantic Ocean. *Journal of Experimental Marine Biology and Ecology*, vol. 458, p. 46-56.
- Lara-Lara, J. R., et al. (2008). Los ecosistemas costeros, insulares y epicontinentales. In CONABIO, *Capital natural de México vol. I : Conocimiento actual de la biodiversidad*, (p. 109-134). Mexique, CONABIO.

- Legator, M. S., Singleton, C. R., Morris, D. L. & Philips, D. L. (2001). Health effects from chronic low-level exposure to hydrogen sulfide. *Archives of Environmental Health An International Journal*, vol. 56, no 2, p. 123-131.
- Li, Y., Zhang, R., Liu, G., Chen, C., He, Y. & Liu, X. (2013). Comparison of methane production potential, biodegradability, and kinetics of different organic substrates. *Bioresource Technology*, vol. 149, p. 565-569.
- Maeda, H., Tsukui, T., Sashima, T., Hosokawa, M. & Miyashita, K. (2008). Seaweed carotenoid, fucoxanthin, as a multi-functional nutrient. *Asia Pac J Clin Nutr*, vol. 17, p. 196-199.
- Mahdy, A., Song, Y., Salama, A., Qiao, W. & Dong, R. (2020). Simultaneous H<sub>2</sub>S mitigation and methanization enhancement of chicken manure through the introduction of the micro-aeration approach. *Chemosphere*, vol. 253, p. 126687. doi:10.1016/j.chemosphere.2020.126687 (Page consultée le 15 mai 2020).
- Maneein, S., Milledge, J. J., Nielsen, B. V. et Harvey, P. J. (2018). A review of seaweed pre-treatment methods for enhanced biofuel production by anaerobic digestion or fermentation. *Fermentation*, vol. 4, no 4, p. 100. doi:10.3390/fermentation4040100 (Page consultée le 18 juin 2020).
- Marquez, G. P. B., Santiañez, W. J. E., Trono, G. C., Montañño, M. N. E., Araki, H., Takeuchi, H. & Hasegawa, T. (2014). Seaweed biomass of the Philippines: Sustainable feedstock for biogas production. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, vol. 38, p. 1056-1068.
- Maurer, A. S., Neef, E. D. & Stapleton, S. (2015). Sargassum accumulation may spell trouble for nesting sea turtles. *Frontiers in Ecology and the Environment*, vol. 13, no 7, p. 394-395.
- McDiarmid, J. (2012, 18 avril). Western Ghana's fisherfolk starve amid algae infestation. *In Inter Press Service*. <http://www.ipsnews.net/2012/04/western-ghanasquos-fisherfolk-starve-amid-algae-infestation/> (Page consultée le 04 février 2020).
- Menez, F., Devault, D., Lopez, P. J. (2018). Photographie d'un barrage artisanal. *In CNRS, Centre national de la recherche scientifique*. [http://www.cnrs.fr/sites/default/files/inline-images/IMG\\_1712%20-%201000px.jpg](http://www.cnrs.fr/sites/default/files/inline-images/IMG_1712%20-%201000px.jpg) (Page consultée le 17 juin 2020).
- Milledge, J. J. & Heaven, S. (2014). Methods of energy extraction from microalgal biomass: a review. *Reviews in Environmental Science and Bio/Technology*, vol. 13, no 3, p. 301-320.
- Milledge, J. J. & Harvey, P. J. (2016a). Golden Tides: problem or golden opportunity? The valorisation of Sargassum from beach inundations. *Journal of Marine Science and Engineering*, vol. 4, no 3.
- Milledge, J. J. & Harvey, P. J. (2016b). Ensilage and anaerobic digestion of Sargassum muticum. *Journal of Applied Phycology*, vol. 28, no 5, p. 3021-3030.

- Milledge, J. J. & Harvey, P. J. (2016c). Potential process 'hurdles' in the use of macroalgae as feedstock for biofuel production in the British Isles. *Journal of Chemical Technology & Biotechnology*, vol. 91, no 8, p. 2221-2234.
- Milledge, J. J. & Harvey, P. J. (2018). Anaerobic digestion and gasification of seaweed. In Rampelotto, P. H. & Trincone, A., *Grand Challenges in Marine Biotechnology* (p. 237-258). Springer International Publishing.
- Milledge, J. J., Nielsen, B. V., Sadek, M. S. & Harvey, P. J. (2018). Effect of freshwater washing pretreatment on *Sargassum muticum* as a feedstock for biogas production. *Energies*, vol. 11, no 7, p. 1771. doi:10.3390/en11071771
- Milledge, J. J., Nielsen, B. V., Maneein, S. & Harvey, P. J. (2019a). A brief review of anaerobic digestion of algae for bioenergy. *Energies*, vol. 12, no 6, p. 1166. doi:10.3390/en12061166 (Page consultée le 18 mai 2020).
- Milledge, J.J., Nielsen, B. V. & Harvey, P. J. (2019b). The inhibition of anaerobic digestion by model phenolic compounds representative of those from *Sargassum muticum*. *Journal of Applied Phycology*, vol. 31, no 1, p. 779-786.
- Milledge, John James, Maneein, S., Arribas López, E. & Bartlett, D. (2020). Sargassum inundations in Turks and Caicos: methane potential and proximate, ultimate, lipid, amino acid, metal and metalloid analyses. *Energies*, vol. 13, no 6, p. 1523. doi:10.3390/en13061523 (Page consultée le 18 mai 2020).
- Moletta, R. (2011). *La méthanisation (2e ed.)*. Paris, Lavoisier.
- Moreira, A. & Alfonso, G. (2013). Inusual arribazón de *Sargassum fluitans* (Børgesen) Børgesen en la costa centro-sur de Cuba. *Revista de Investigaciones marinas*, vol. 2018, p. 1-9
- Nkoa, R. (2014). Agricultural benefits and environmental risks of soil fertilization with anaerobic digestates: a review. *Agronomy for Sustainable Development*, vol. 34, no 2, p. 473-492.
- Notoya, M. (2010). Production of biofuel by macroalgae with preservation of marine resources and environment. In Seckbach, J., Einav R. & Israel, A., *Seaweeds and their Role in Globally Changing Environments* (p. 217-228). Springer Netherlands.
- Novedades Quintana Roo (2018). Baja la captura de langostas en Punta Allen por el sargazo. In *Novedades Quintana Roo*. <https://sipse.com/novedades/reduce-pesca-langostas-punta-allen-sargazo-captura-ciclo-reproduccion-especie-medio-ambiente-307877.html> (Page consultée le 12 avril 2020).
- Oliveira, J. V., Alves, M. M. & Costa, J. C. (2015). Optimization of biogas production from *Sargassum sp.* using a design of experiments to assess the co-digestion with glycerol and waste frying oil. *Bioresource Technology*, vol. 175, p. 480-485.

- Ortega, R. P., Toche, N. & Valero, M. V. (2019). 'Es un desastre ecológico': la crisis del sargazo en México. *In The New York Times*.  
<https://www.nytimes.com/es/2019/08/16/espanol/america-latina/sargazo-playas-mexico.html> (Page consultée le 14 avril 2020).
- Oude Elferink, S. J. W. H., Driehuis, F., Gottschal, J. C. & Spoelstra, S. F. (2000). Silage fermentation processes and their manipulation. *In Organisation des Nations unies pour l'alimentation et l'agriculture*. <http://www.fao.org/3/X8486E/x8486e09.htm> (Page consultée le 15 juin 2020)
- Oviatt, C. A., Huizenga, K., Rogers, C. S. & Miller, W. J. (2019). What nutrient sources support anomalous growth and the recent Sargassum mass stranding on Caribbean beaches? A review. *Marine Pollution Bulletin*, vol. 145, p. 517-525.
- Peel, M. C., Finlayson, B. L. & McMahon, T. A. (2016). *English: Updated world map of the Köppen-Geiger climate classification* [document cartographique].
- Philippsen, A., Wild, P. & Rowe, A. (2014). Energy input, carbon intensity and cost for ethanol produced from farmed seaweed. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, vol. 38, p. 609-623
- Préfecture de la Martinique. (2018). *Les sargasses en clair. Le guide qui répond à toutes vos questions sur le phénomène*. Martinique, France, Préfecture de la Martinique, 6 p.  
<http://www.martinique.gouv.fr/content/download/12492/93563/file/SARGASSE%20RELOADED%20V3-final-web%20.pdf> (Page consultée le 10 avril 2020).
- Putman, N. F., Goni, G. J., Gramer, L. J., Hu, C., Johns, E. M., Trinanes, J. & Wang, M. (2018). Simulating transport pathways of pelagic Sargassum from the Equatorial Atlantic into the Caribbean Sea. *Progress in Oceanography*, vol. 165, p. 205-214.
- Quintal-Novelo, C., Rangel-Méndez, J., Ortiz-Tello, Á., Graniel-Sabido, M., Vaca, R. P.-C. D. & Moo-Puc, R. (2018). A Sargassum fluitans Borgesien Ethanol extract exhibits a hepatoprotective effect in-vivo in acute and chronic liver damage models. *BioMed Research International*, vol. 2018, no 13, p. 1-9.
- Reguero, B. G., Secaira, F., Toimail, A., Escudero, M., Díaz-Simal, P., Beck, M. W., Silva, R., Storlazzi, C. & Losada, I. J. (2019). The risk reduction benefits of the mesoamerican reef in Mexico. *Frontiers in Earth Science*, vol. 7.
- Reportur (2019). Fotos - Los inicios de Cancún sin hoteles tras 50 años de fundarse. *In Reportur, Reportur*. <https://www.reportur.com/mexico/2019/08/21/fotos-los-inicios-cancun-sin-hoteles-tras-50-anos-fundarse/#comments> (Page consultée le 10 mars 2020).
- Resiere, D. *et al.* (2018). Sargassum seaweed on Caribbean islands: an international public health concern. *The Lancet*, vol. 392, no 10165, p. 2691. doi:10.1016/S0140-6736(18)32777-6 (Page consultée le 12 mars 2020).

- Reverdy, A. L., Baudez, J. C. & Dieudé-Fauvel, E. (2011). *La méthanisation des boues issues du traitement des eaux usées : comparaison des performances de 3 technologies différentes*. France, Irstea, 41 p. <https://hal.inrae.fr/hal-02598022/document> (Page consultée le 22 juin 2020).
- Reza, A. & Meraz, F. (2019). Calculan caída de 30% en la llegada de turistas a Cancún. *In Milenio*. <https://www.milenio.com/negocios/calculan-caida-30-llegada-turistas-cancun> (Page consultée le 10 mars 2020).
- Ricard, M.-A. et al. (2010). *Développer un cadre d'analyse et identifier l'intérêt technico-économique de produire du biogaz à la ferme dans un contexte québécois : rapport final*. Québec, Centre de développement du porc du Québec, 240 p.
- Rioja-Nieto, R. & Álvarez-Filip, L. (2019). Coral reef systems of the Mexican Caribbean: Status, recent trends and conservation. *Marine Pollution Bulletin*, vol. 140, p. 616-625.
- Rodriguez, C., Alaswad, A., Mooney, J., Prescott, T. & Olabi, A. G. (2015). Pre-treatment techniques used for anaerobic digestion of algae. *Fuel Processing Technology*, vol. 138, p. 765-779.
- Rodríguez-Martínez, R., van Tussenbroek, B. I. & Jordán-Dahlgren, E. (2016). Afluencia masiva de sargazo pelágico a la costa del Caribe mexicano (2014-2015). *In* Garcia-Mendoza, E., Quijano-Scheggia, S. I., Olivos-Ortiz, A. & Núñez-Vázquez, E. J., *FloreCIMIENTOS algales nocivos en México* (1<sup>re</sup> éd., p. 352-365). Red Temática sobre Florecimientos Algales Nocivos.
- Rodríguez-Martínez, R. E., Medina-Valmaseda, A. E., Blanchon, P., Monroy-Velázquez, L. V., Almazán-Becerril, V., Delgado-Pech, B., Vásquez-Yeomans, L., Francisco, V. & García-Rivas, M. C. (2019). Faunal mortality associated with massive beaching and decomposition of pelagic *Sargassum*. *Marine Pollution Bulletin*, vol. 146, p. 201-205.
- Rodríguez-Martínez, R. E., Roy, P. D., Torrescano-Valle, N., Cabanillas-Terán, N., Carrillo-Domínguez, S., Collado-Vides, L., García-Sánchez, M. & van Tussenbroek, B. I. (2020). Element concentrations in pelagic *Sargassum* along the Mexican Caribbean coast in 2018-2019. *PeerJ*, vol. 8, e8667. doi:10.7717/peerj.8667
- SAFEGE. (2019a). *Évaluation des méthodes de ramassage de sargasse : Collecte manuelle*. Guadeloupe, France, Agence de l'Environnement et de la Maitrise de l'Énergie (ADEME), 3 p. <https://www.guadeloupe.ademe.fr/expertises/algues-sargasses/techniques-de-collecte> (Page consultée le 13 juin 2020).
- SAFEGE. (2019b). *Évaluation des méthodes de ramassage de sargasse : Ratisseur*. Guadeloupe, France, Agence de l'Environnement et de la Maitrise de l'Énergie (ADEME), 4 p. <https://www.guadeloupe.ademe.fr/expertises/algues-sargasses/techniques-de-collecte> (Page consultée le 13 juin 2020).
- SAFEGE. (2019c). *Évaluation des méthodes de ramassage de sargasse : Véhicule automoteur de ramassage d'AXINOR*. Guadeloupe, France, Agence de l'Environnement et de la Maitrise



- de l'Énergie (ADEME), 4 p. <https://www.guadeloupe.ademe.fr/expertises/algues-sargasses/techniques-de-collecte> (Page consultée le 13 juin 2020).
- SAFEGE. (2019d). *Évaluation des méthodes de ramassage de sargasse : Cane Loader*. Guadeloupe, France, Agence de l'Environnement et de la Maitrise de l'Énergie (ADEME), 4 p. <https://www.guadeloupe.ademe.fr/expertises/algues-sargasses/techniques-de-collecte> (Page consultée le 13 juin 2020).
- SAFEGE. (2019e). *Évaluation des méthodes de ramassage de sargasse : Grutage*. Guadeloupe, France, Agence de l'Environnement et de la Maitrise de l'Énergie (ADEME), 2 p. <https://www.guadeloupe.ademe.fr/expertises/algues-sargasses/techniques-de-collecte> (Page consultée le 13 juin 2020).
- SAFEGE. (2019f). *Évaluation des méthodes de ramassage de sargasse : Râteau goémonier*. Guadeloupe, France, Agence de l'Environnement et de la Maitrise de l'Énergie (ADEME), 2 p. <https://www.guadeloupe.ademe.fr/expertises/algues-sargasses/techniques-de-collecte> (Page consultée le 13 juin 2020).
- SAFEGE. (2019g). *Évaluation des méthodes de ramassage de sargasse : Barrage flottant artisanal*. Guadeloupe, France, Agence de l'Environnement et de la Maitrise de l'Énergie (ADEME), 3 p. <https://www.guadeloupe.ademe.fr/expertises/algues-sargasses/techniques-de-collecte> (Page consultée le 13 juin 2020).
- SAFEGE. (2019h). *Évaluation des méthodes de ramassage de sargasse : Barrage flottant artisanal n°2*. Guadeloupe, France, Agence de l'Environnement et de la Maitrise de l'Énergie (ADEME), 3 p. <https://www.guadeloupe.ademe.fr/expertises/algues-sargasses/techniques-de-collecte> (Page consultée le 13 juin 2020).
- SAFEGE. (2019i). *Évaluation des méthodes de ramassage de sargasse : Barrage flottant Algaenova*. Guadeloupe, France, Agence de l'Environnement et de la Maitrise de l'Énergie (ADEME), 3 p. <https://www.guadeloupe.ademe.fr/expertises/algues-sargasses/techniques-de-collecte> (Page consultée le 13 juin 2020).
- SAFEGE. (2019j). *Évaluation des méthodes de ramassage de sargasse : Barrage flottant*. Guadeloupe, France, Agence de l'Environnement et de la Maitrise de l'Énergie (ADEME), 3 p. <https://www.guadeloupe.ademe.fr/expertises/algues-sargasses/techniques-de-collecte> (Page consultée le 13 juin 2020).
- SAFEGE. (2019k). *Évaluation des méthodes de ramassage de sargasse : Petite barge à tapis convoyeur*. Guadeloupe, France, Agence de l'Environnement et de la Maitrise de l'Énergie (ADEME), 4 p. <https://www.guadeloupe.ademe.fr/expertises/algues-sargasses/techniques-de-collecte> (Page consultée le 13 juin 2020).
- SAFEGE. (2019l). *Évaluation des méthodes de ramassage de sargasse : Drague aspiratrice en marche*. Guadeloupe, France, Agence de l'Environnement et de la Maitrise de l'Énergie (ADEME), 3 p. <https://www.guadeloupe.ademe.fr/expertises/algues-sargasses/techniques-de-collecte> (Page consultée le 13 juin 2020).

- Saraswati, Giriwono, P. E., Iskandriati, D., Tan, C. P. et Andarwulan, N. (2019). Sargassum seaweed as a source of anti-inflammatory substances and the potential insight of the tropical species: A review. *Marine Drugs*, vol. 17, no 10.
- Schultz Schiro, J. A., Meyer-arendt, K. J. & Schneider, S. K. (2017). Sargassum on Santa Rosa Island, Florida: faunal use and beachgoer perception. *Journal of Coastal Conservation*, vol. 21, no 1, p. 63-83.
- SEMAR (Secrétariat de Marine). (2019a). Suman más de 80 mil toneladas de sargazo del esfuerzo coordinado entre Instituciones de los tres órdenes de gobierno y la sociedad civil. *In Gobierno de Mexico*. <http://www.gob.mx/semar/prensa/suman-mas-de-80-mil-toneladas-de-sargazo-del-esfuerzo-coordinado-entre-instituciones-de-los-tres-ordenes-de-gobierno-y-la-sociedad-civil?idiom=es> (Page consulté le 16 juin 2020).
- SEMAR (Secrétariat de Marine). (2019b). La Secretaría de Marina-Armada de México realiza un esfuerzo constante en la limpieza del sargazo en las Playas del Estado de Quintana Roo. *In Gobierno de Mexico*. <http://www.gob.mx/semar/prensa/la-secretaria-de-marina-armada-de-mexico-realiza-un-esfuerzo-constante-en-la-limpieza-del-sargazo-en-las-playas-del-estado-de-quintana-roo-218490> (Page consulté le 3 avril 2020).
- SEMARNAT (Secrétariat de l'environnement et des ressources naturelles) (2017). Antecedentes. *In Gobierno de Mexico*. <http://www.gob.mx/semarnat/acciones-y-programas/antecedentes-sargazo> (Page consulté le 3 avril 2020).
- SEMARNAT (Secrétariat de l'environnement et des ressources naturelles) (2018a). Plan sustentable ante arribazón anormal de sargazo. *In Gobierno de Mexico*. <http://www.gob.mx/semarnat/acciones-y-programas/plan-sustentable-ante-arribazon-anormal-de-sargazo> (Page consulté le 3 avril 2020).
- SEMARNAT (Secrétariat de l'environnement et des ressources naturelles) (2018b). Instala UNAM Comité Científico para atender arribazón de sargazo. *In Gobierno de Mexico*. <http://www.gob.mx/semarnat/prensa/instala-unam-comite-cientifico-para-atender-arribazon-de-sargazo> (Page consulté le 13 août 2020).
- SEMARNAT (2019). Lineamientos técnicos y de gestión para la atención de la contingencia ocasionada por sargazo en el caribe mexicano y el golfo de México. *In Gobierno de Mexico*. [https://www.gob.mx/cms/uploads/attachment/file/479985/Lineamientos\\_Sargazo\\_2019.pdf](https://www.gob.mx/cms/uploads/attachment/file/479985/Lineamientos_Sargazo_2019.pdf) (Page consulté le 17 juin 2020).
- Seppälä, M., Paavola, T., Lehtomäki, A., Pakarinen, O. & Rintala, J. (2008). Biogas from energy crops—optimal pre-treatments and storage, co-digestion and energy balance in boreal conditions. *Water Science and Technology*, vol 58, no 9, p. 1857-1863.
- Silva, L. D., Bahcevandziev, K. & Pereira, L. (2019). Production of bio-fertilizer from *Ascomyllum nodosum* and *Sargassum muticum* (Phaeophyceae). *Journal of Oceanology and Limnology*, vol. 37, no 3, p. 918-927.

- Sindhu, R., Binod, P. & Pandey, A. (2016). Biological pretreatment of lignocellulosic biomass – An overview. *Bioresource Technology*, vol. 199, p. 76-82.
- Smetacek, V. & Zingone, A. (2013). Green and golden seaweed tides on the rise. *Nature*, vol. 504, no 7478, p. 84-88.
- Soto, M., Vázquez, M. A., de Vega, A., Vilariño, J. M., Fernández, G. & de Vicente, M. E. S. (2015). Methane potential and anaerobic treatment feasibility of *Sargassum muticum*. *Bioresource Technology*, vol. 189, p. 53-61.
- Stimpfling, E. (2015). Un navire collecteur de sargasses testé en Guadeloupe. *In le marin, le marin*. <https://lemarin.ouest-france.fr/secteurs-activites/environnement/22768-un-navire-collecteur-de-sargasses-teste-en-guadeloupe> (Page consultée le 19 juin 2020).
- Suhartini, S., Nurika, I., Rahmah, N. L., Paul, R. & Melville, L. (2020). Potential of *Gracilaria sp.* as single-or co-digestion feedstock for biogas production. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*, vol. 460, p. 012032. doi:10.1088/1755-1315/460/1/012032 (Page consultée le 19 mai 2020).
- Sun, H., Kovalovszki, A., Tsapekos, P., Alvarado-Morales, M., Rudatis, A., Wu, S., Dong, R., Kougias, P. G. & Angelidaki, I. (2019). Co-digestion of *Laminaria digitata* with cattle manure: A unimodel simulation study of both batch and continuous experiments. *Bioresource Technology*, vol. 276, p. 361-368.
- Tedesco, S., Marrero Barroso, T. & Olabi, A. G. (2014). Optimization of mechanical pre-treatment of *Laminariaceae spp.* biomass-derived biogas. *Renewable Energy*, vol. 62, p. 527-534.
- ter Beek, V. (2013). Olmix consortium opens first algae plant in Brittany. *In PigProgress*. <https://www.pigprogress.net/Finishers/Articles/2013/9/Olmix-consortium-opens-first-algae-plant-in-Brittany-1360106W/> (Page consultée le 05 mars 2020).
- Théry, H. (2018). Cancún, un complexe touristique créé ex nihilo. *Confins*, no 36. <https://doi.org/10.4000/confins.14719> (Page consultée le 19 mars 2020).
- Thompson, Terrell M., Young, B. R. & Baroutian, S. (2019). Advances in the pretreatment of brown macroalgae for biogas production. *Fuel Processing Technology*, vol. 195, p. 106151. doi:10.1016/j.fuproc.2019.106151 (Page consultée le 16 mai 2020).
- Thompson, T. M., Young, B. R. & Baroutian, S. (2020). Pelagic *Sargassum* for energy and fertiliser production in the Caribbean: A case study on Barbados. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, vol. 118.
- Valderrma, D., Cai, J., Hishamunda, N. & Ridler, N. (2014). *Social and Economic Dimensions of Carrageenan Seaweed Farming*. Organisation des Nations unies pour l'alimentation et l'agriculture, 217 p.

- van Tussenbroek, B. I., Hernández Arana, H. A., Rodríguez-Martínez, R. E., Espinoza-Avalos, J., Canizales-Flores, H. M., González-Godoy, C. E., Barba-Santos, M. C., Vega-Zepeda, A. & Collado-Vides, L. (2017). Severe impacts of brown tides caused by *Sargassum spp.* on near-shore Caribbean seagrass communities. *Marine Pollution Bulletin*, vol. 122, no 1, p. 272-281.
- Villalobos-Zapata, G. J. & Mendoza Vega, J. (2010). *La biodiversidad en Campeche: Estudio de Estado. Comisión Nacional para el Conocimiento y Uso de la Biodiversidad*. CONABIO, 748 p.
- Vos, B., Foursoff, W., de Bruijn, L. & Bruijn, W. (2016). *Coastal seaweed solutions*. Delft University of Technology, 137 p. <https://repository.tudelft.nl/islandora/object/uuid%3A4de9aa1b-a9a9-4dcb-bfef-82fe4ae0584c> (Page consultée le 5 mai 2020).
- Wang, M., Hu, C., Barnes, B. B., Mitchum, G., Lapointe, B. & Montoya, J. P. (2019). The great Atlantic Sargassum belt. *Science*, vol. 365, no 6448, p. 83-87.
- Widyaningrum, T., Prastowo, I., Parahadi, M. & Prasetyo, A. D. (2016). Production of bioethanol from the hydrolysate of brown seaweed (*Sargassum crassifolium*) using a naturally  $\beta$ -glucosidase producing yeast *Saccharomyces cereviceae* JCM 3012. *Biosciences Biotechnology Research Asia*, vol. 13, no 3, p. 1333-1340.
- Williams, A. & Feagin, R. (2010). Sargassum as a natural solution to enhance dune plant growth. *Environmental Management*, vol. 46, no 5, p. 738-747.
- Ye, N., Zhang, X., Mao, Y., Liang, C., Xu, D., Zou, J., Zhuang, Z. & Wang, Q. (2011). 'Green tides' are overwhelming the coastline of our blue planet: taking the world's largest example. *Ecological Research*, vol. 26, no 3, p. 477. doi:10.1007/s11284-011-0821-8 (Page consultée le 03 janvier 2020).
- Zamora, J., Guadarrama, R. & Velázquez, A. (2018). Sargazo de las playas de Quintana Roo, negocio desperdiciado. *In La Verdad, La Verdad*. <https://laverdadnoticias.com/quintanaroo/Sargazo-de-las-playas-de-Quintana-Roo-negocio-desperdiciado--20180426-0010.html> (Page consultée le 24 avril 2020)
- Zhang, Y., Alam, M. A., Kong, X., Wang, Z., Li, L., Sun, Y. & Yuan, Z. (2017). Effect of salinity on the microbial community and performance on anaerobic digestion of marine macroalgae. *Journal of Chemical Technology & Biotechnology*, vol. 92, no 9, p. 2392-2399.
- Zhang, Y., Li, L., Kong, X., Zhen, F., Wang, Z., Sun, Y., Dong, P. & Lv, P. (2017). Inhibition effect of sodium concentrations on the anaerobic digestion performance of Sargassum Species. *Energy Fuels*, vol. 31, no 7, p. 7101-7109.

**ANNEXE 1 :**

**Tableau comparatif des différentes méthodes de collecte des sargasses**

Méthode de récolte	Collecte manuelle en rive	Collecte mécanique en rive						Collecte mécanique en mer	
	Ramassage manuel	Pelle mécanique hydraulique	Ratasseur	Véhicule d'AXINOR	Cane loader	Grutage	Râteau goémonier	Barge à tapis convoyeur	Drague aspiratrice en marche
Rendement	Faible	Très élevé	Moyen	Élevé	Très Élevé	Moyen	Pas de collecte	Moyen	Très élevé
	(1,8-2,6 m3/h/p)	(100-200 m3/h)	(30 m3/h)	(100 m3/h)	(170-210 m3/h)	-		(20-30 m3/h)	(450 m3/h)
Main d'œuvre	Élevée	Faible	Faible	Faible	Faible	Faible	Faible	Moyenne	Élevée
Accessibilité aux plages	Élevée	Faible	Faible	Faible	Faible	Faible	Faible	-	-
Mobilité sur la plage/sur l'eau	Faible	Moyenne	Élevé	Élevé	Élevé	-	Élevé	Élevé	Faible
Coût des équipements	Faible	Élevé	Élevé	Très élevé	Moyen	Élevé	Élevé	Élevé	Très élevé
Évacuation des algues facilitée	Non	Oui	Oui	Oui	Oui	Non	Non	-	-
Risque d'ensablement	Non	Oui	Oui	Oui	Oui	-	Oui	-	-
Exposition sanitaire	Élevée	Faible	Faible	Faible	Élevée	Faible	Faible	Très faible	Très faible
Pénibilité	Élevée	Faible	Faible	Faible	Moyenne	Faible	Faible	Faible	Faible
Érosion	Très faible	Très élevée	Faible	Très faible	Faible	Moyenne	Très élevée	Nulle	Nulle
Préservation des sites de pontes des tortues	Élevée	Faible	Faible	Faible	Faible	-	Faible	Élevée	Élevée
Ramassage des matières indésirables	Non	Oui	Oui	Oui	Oui	Oui	Oui	Oui	Oui

Source : SAFEGE (2019a-l); Chereau (2019)